

**П. И. Ящерицын
А. Г. Зайцев
А. И. Барботько**

**ТОНКИЕ
ДОВОДОЧНЫЕ
ПРОЦЕССЫ
ОБРАБОТКИ
ДЕТАЛЕЙ
МАШИН
И ПРИБОРОВ**

[WWW.CHIPMAKER.RU](http://www.chipmaker.ru)

**Издательство
«Наука и техника»**

П. И. Ящерицын,
А. Г. Зайцев,
А. И. Барботько

**ТОНКИЕ
ДОВОДОЧНЫЕ
ПРОЦЕССЫ
ОБРАБОТКИ
ДЕТАЛЕЙ
МАШИН
И ПРИБОРОВ**

Минск
Издательство
«Наука и техника»
1976

Ящерицын П. И., Зайцев А. Г., Барботько А. И. **Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов.** Минск, «Наука и техника», 1976, 328 с.

В книге освещены вопросы доводки деталей машин и приборов, выполняемой с помощью различных абразивных материалов. Приведены результаты научных исследований и передового производственного опыта по применению абразивно-алмазных паст и суспензий на финишных операциях. Представлены данные отечественных и зарубежных исследователей по тонким доводочным процессам (притирке и полированию). Описано оборудование для доводки плоских, цилиндрических и сферических поверхностей. Подробно рассматривается влияние финишной обработки на формирование качества поверхности и эксплуатационные свойства доведенных деталей, повышение долговечности и надежности их работы. Даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию процесса доводки.

Рассчитана на научных сотрудников и инженерно-технических работников машиностроительной, приборостроительной и оптико-механической промышленности. Может быть использована студентами и аспирантами технических вузов соответствующих специальностей.

Таблиц 61. Иллюстраций 100. Библиография — 152 названия.

Рецензенты:

член-корреспондент АН БССР В. Н. Чачин, кандидат технических наук
М. Л. Еременко

31302—090
Я — 128—76
МЗ16—76

© Издательство «Наука и техника», 1976.

На XXV съезде КПСС отмечалась необходимость дальнейшего развития машиностроения — основы технического перевооружения всех отраслей народного хозяйства нашей страны. Технический прогресс в машиностроении характеризуется как постоянным совершенствованием конструкций машин и приборов, так и непрерывным улучшением технологии их производства.

В машиностроении и приборостроении происходит непрерывная интенсификация процессов в результате повышения скоростей относительного перемещения контактирующих поверхностей, нагрузок, давлений, температур, частот и других параметров. Возрастают требования к износоустойчивости, усталостной прочности, антикоррозионной стойкости и т. д. Одновременно повышается точность работы машин и механизмов, а также их надежность и долговечность. В связи с этим возрастают требования к качеству изготовления деталей машин и приборов, что существенно усиливает роль отделочной обработки.

Совершенствование технологических процессов окончательной обработки, изыскание и внедрение новых прогрессивных методов финишных процессов позволяют обеспечить необходимую высокую точность и качество обработанных поверхностей деталей машин. Среди отделочных операций наибольшее распространение получили операции обработки абразивными инструментами.

Настоящая работа посвящена изучению явлений, происходящих при тонкой абразивной обработке. В ней большое внимание уделено таким отделочным процессам обработки свободным абразивом, как притирка и полирование, а также отражены и другие методы финишной обработки. Рассматриваются прогрессивная технология производства притиров, автоматизация их изготовления, абразивные материалы, применяемые при доводке и полировании, в том числе и изготовленные на основе пиррофорных элементов (циркония, тория и др.). Освоение и широкое применение в промышленности алмазов и других сверхтвердых материалов способствовало совершенствованию оборудования, предназначенного для финишных операций. Подробно изучено влияние финишной обработки на формирование качества поверхности и на эксплуатационные свойства деталей, повышение долговечности и надежности их работы. Особое внимание уделено физической сущности рассматриваемых процессов обработки.

Таким образом, изучение отдельных явлений и технологических закономерностей позволило более полно и достоверно представить общую картину сложного процесса формирования конечных характеристик качества обработанных поверхностей, значительно усовершенствовать процессы обработки и при высокой производительности получать хорошее качество поверхности, обеспечивающее повышенную надежность и долговечность деталей машин и приборов.

В работе рядом со значением почти всех величин, приведенных в наиболее общеупотребительных единицах, указано их значение в системе СИ. Однако в отдельных случаях использованы и внесистемные единицы. При переводе в систему СИ численных значений величин, выраженных в других системах, авторы сохранили такое количество знаков, которое при обратном переводе позволило бы получить более точное их значение с помощью следующих соотношений: $1 \text{ кг} = 9,81 \text{ н}$, $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ дж}$, $1 \text{ Å} = 0,1 \text{ нм}$, $1 \text{ мк} = 1 \text{ мкм}$, $1 \text{ кг/мм}^2 = 9,81 \text{ Мн/м}^2$, $1 \text{ об/мин} = 0,105 \text{ рад/сек}$, $1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ н/м}^2$, $1 \text{ кг/см}^2 = 98,1 \text{ кн/м}^2$, $1 \text{ ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{сек}$, $1 \text{ эрг/см}^2 = 1 \text{ дин/см} \approx 10^{-3} \text{ н/м}$, $1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ н}$, $1 \text{ кал/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C} = 4,1868 \cdot 10^2 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$, $1 \text{ кал/г} \cdot ^\circ\text{C} = 4,1868 \cdot 10^3 \text{ дж/(кг} \cdot \text{град)}$, $1 \text{ ом} \cdot \text{см} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ ом} \cdot \text{м}$, $1 \text{ эв} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ дж}$, $1^\circ = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$, $1' = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$. В работе использованы две температурные шкалы — Цельсия и Кельвина.

АБРАЗИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ТОНКИХ ПРОЦЕССАХ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

1. Абразивные материалы и их основные свойства

Создание современных машин и приборов требует широкого применения технологических методов, которые обеспечивали бы высокие качества обработки деталей и повышенную точность их изготовления. Повышению точности и качества обработки способствует применение тонких доводочных и отделочных процессов. Для этих целей могут быть использованы притирка, хонингование, суперфиниширование и полирование.

Притирка позволяет получать точность изготовления деталей до 1-го класса и выше, шероховатость поверхности до 10—13-го классов и улучшить геометрическую форму [1]. Для обеспечения высокого класса шероховатости, а также для повышения антикоррозионных, прочностных и других качеств широко применяют полирование. В процессе притирки с обрабатываемой поверхности снимается тонкий слой металла. Производится притирка на доводочных станках или вручную абразивными брусками или же притирами с помощью специальных доводочных паст. Основной компонент притирочной и полировальной пасты — абразивный материал.

Абразивные материалы, применяемые при доводке, подразделяются на естественные и искусственные. К естественным абразивным материалам относятся алмаз, корунд, наждак, гранат, кварц, кремнь, пемза, полевой шпат, гематит (крокус), каолин, маршалит, диатомит, мел, трепел, тальк, известняк и др. Каждый абразивный материал, используемый при притирке, полировании и других методах отделочной обработки, имеет свою область применения [2].

Область применения абразивного материала определяется его физико-механическими свойствами, основные из которых — твердость, прочность на сжатие и на изгиб, абразивная способность, механическая прочность, удельный вес (плотность), модуль упругости, термостойкость, тепло- и температуропроводность, коэффициент линейного расширения, минералогическая и размерная однородность зернового состава, форма абразивного зерна и др.

По твердости абразивные материалы подразделяются на три группы: высокой твердости (алмаз, эльбор, карбид бора, карбид кремния, электрокорунд, корунд, наждак); средней твердости (кварц, кремнь, агат,

гранат, полевой шпат, гранит, базальтовые лавы, пемза); низкой твердости (трепел, диатомит, опока, крокус, мел, тальк).

Количественно твердость абразивных материалов оценивается по десятибалльной шкале Мооса или по пятнадцатибалльной шкале Риджвея и по микротвердости. По шкале Мооса твердость абразивных материалов располагается в следующей последовательности: алмаз — 10, корунд — 9, топаз — 8, кварц — 7, полевой шпат — 6, апатит — 5, плавленый шпат — 4, известковый шпат — 3, гипс — 2, тальк — 1.

К материалам высокой твердости относятся абразивы с твердостью по шкале Мооса свыше 7, материалы с твердостью от 5 до 7 (включительно) составляют группу средней твердости, а материалы, твердость которых менее 5, — группу абразивных материалов низкой твердости. Для притирки применяются главным образом абразивы высокой и средней твердостей, а материалы низкой твердости используются в основном для полирования.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Естественные (природные) абразивные материалы представляют собой горные породы и минералы. Применяются эти материалы (главным образом в измельченном состоянии) для поверхностного диспергирования и механической обработки.

А л м а з (условное обозначение А) — одна из модификаций углерода с прочными ковалентными связями между атомами [2]. Микротвердость естественного алмаза составляет 10 060 кг/мм² (98688,6 Мн/м²) (табл. 1); модуль упругости — 90 000 кг/мм² (882,9 Гн/м²); прочность при изгибе — 21—49 кг/мм² (206,01—480,69 Мн/м²), а при сжатии — 200 кг/мм² (1962 Мн/м²). На свойства алмаза существенное влияние оказывают примеси. Количество примесей в алмазных микропорошках должно быть не более 2,5%, влаги — не более 0,2%. В зависимости от примесей изменяется и цвет алмаза.

По цвету алмазы можно разделить на пять следующих категорий: бесцветные, желтые, бурые, серые и черные. В каждой из них имеются переходы от светлых до темноокрашенных тонов. Под воздействием ультрафиолетовых, рентгеновских или катодных лучей алмаз может люминесцировать голубым, темно-зеленым или красным цветом. Окраска свечения зависит от вида примесей, структуры кристалла и вида облучения. В рентгеновских лучах и при ионной бомбардировке алмазы дают голубую или синюю люминесценцию.

По свечению в ультрафиолетовых лучах кристаллы алмаза подразделяются на четыре группы [3, 4]: 1) нелюминесцирующие; 2) люминесцирующие локально различными цветами; 3) люминесцирующие голубым светом; 4) люминесцирующие зелено-желтым светом.

По цветовой окраске алмаза можно судить о его качестве. Как правило, бесцветные алмазы являются наиболее твердыми и износостойкими, т. е. наиболее качественными. Микропорошки, полученные из кристаллов разной цветовой окраски, имеют различную абразивную способность. Кристаллы первой группы дают порошки с наиболее высокой

Таблица 1
Физико-механические свойства абразивных материалов высокой твердости [2]

Абразив	Плотность			Твердость			Микротвердость	
	кг/мм ²	г/см ³	кг/м ³	по Моосу	по Риджвею	кг/мм ²	Мн/м ²	
Алмаз естественный А	21—49	3,01—3,56	3010—3560	10	15	10060	98688,6	
Алмаз синтетический АС	30	3,48—3,54	3480—3540	10	15	8600—10100	84366—99081	
Эльбор (кубический нитрид бора) Л	—	3,45—3,54	3450—3540	9,8—10	15	7300—10000	71613—98100	
Карбид бора (В ₄ С) КБ	15,5	2,48—2,52	2480—2520	9,3	14	4000—5000	39240—49050	
Карбид кремния	8,72	3,16—3,39	3160—3390	9,2	13	2850—3600	27958,5—35316	
Электрокорунд	25—68*	3,93—4,16	3930—4160	9—9,1	12	1800—2780	17658—27271,8	
Корунд	(в среднем 35)	3,82—4,28	3820—4280	9	12	2060	20208,6	

Абразив	Прочность			Модуль упругости		Абразивная способность	
	кг/мм ²	при изгибе	при сжатии	кг/мм ²	Гн/м ²		
Алмаз естественный А	21—49	206,01—480,69	200	1962	90000	882,9	1,0
Алмаз синтетический АС	30	294,3	200	1962	(74—105) · 10 ³	725,94—1030,05	0,75—0,77
Эльбор (кубический нитрид бора) Л	—	—	—	—	—	—	0,58—0,64
Карбид бора (В ₄ С) КБ	30	294,3	180	1765,8	29600	290,376	0,4—0,6
Карбид кремния	15,5	152,055	150	1471,5	39400	386,514	0,25—0,45
Электрокорунд	8,72	85,5432	75,7	42,617	(3—5,2) · 10 ³	294,3—510,12	0,12—0,25
Корунд	25—68*	245,25—667,08*	98—304*	961,38—	38200	374,742	0,1
	(в среднем 35)	(в среднем 343,35)	(в среднем 200)	—2982,24*			
				(в среднем 1962)			

* Данные для кристаллов рубина и лейкосапфира; значения прочности при изгибе даны по графику [9].

абразивной способностью, порошки, полученные из кристаллов, люминесцирующих локально различными цветами, обладают меньшей способностью, а самой низкой — порошки, полученные из алмазных кристаллов третьей и четвертой групп. Такое различие проявляется не только по абразивной способности.

Многочисленные опыты [5] позволили установить, что связь между характером люминесценции и качеством алмаза существует и для оптических, кристалломорфологических и других физико-механических свойств. На основании комплексного изучения этих свойств сделана попытка классифицировать алмазы на 10 групп. Однако в промышленном производстве алмазов такая классификация пока не получила распространения. Интересные исследования по цветовой аттестации естественных алмазов ведутся во Всесоюзном научно-исследовательском институте алмазного инструмента и процессов алмазной обработки (ВНИИАлмаз).

Из отечественных естественных алмазов наиболее известны алмазы Сибирских месторождений. Сравнительное изучение отечественных природных алмазов Якутских месторождений [6] показало, что высококачественные кристаллы почти всегда прозрачны, обладают сильным блеском, не содержат включений графита и в большинстве люминесцируют в ультрафиолетовых лучах сине-голубым цветом.

При сжигании алмаза образуется зола, количество которой колеблется в широких пределах: от следов до 20% [7]. При сжигании бесцветных алмазов содержание золы незначительно — не превышает 0,05%. Сгорание на воздухе начинается при 840—860 °C (1113—1133 °K); в струе кислорода температура сгорания составляет 720 °C (993 °K). На температуру сгорания алмаза оказывает влияние размер зерна. Микropорошок сгорает при более низкой температуре, чем крупное зерно.

При высоких температурах алмаз постепенно графитизируется. В вакууме температура перехода в графит равна 1400 °C (1673 °K). На воздухе же такой переход начинается при 800—820 °C (1073—1093 °K) [2]. Если при нагревании алмаза присутствуют некоторые активные металлы, например железо, то, начиная с 750 °C (1023 °K), происходит растворение алмаза в железе. Корродирует алмаз и в расплавах соды, NaOH, KHSO₄, NaNO₃, но по сравнению с другими минералами он обладает очень высокой химической устойчивостью, не травится в азотной, серной, соляной, плавиковой и других крепких кислотах.

Алмаз, являясь плохим проводником электричества, в то же время хорошо проводит тепло (табл. 2). Коэффициент теплопроводности его равен 0,35 кал/см·сек·град (146,538 вт/(м·град)), что в 9—10 раз выше, чем у карбида кремния, в 2—6, чем у твердых сплавов, и в 5—6 раз выше, чем у быстрорежущей стали. Теплоемкость алмаза довольно высокая — 0,12 кал/г·град (502,416 дж/(кг·град)). Например, удельная теплоемкость твердого сплава ВК8 в 3 раза ниже, чем алмаза.

Из других теплофизических свойств алмаза отметим весьма низкие коэффициенты линейного и объемного расширения. Коэффициент линейного расширения алмаза в 3—5 раз меньше, чем карбида кремния, и в 3—8 раз ниже, чем твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

Таблица 2

Тепловые и электрические свойства абразивных материалов высокой твердости [2]

Абразив	Термостойкость		Теплопроводность		Удельная теплоемкость	
	°C	°K	кал/см×сек·°C	вт/(м×град)	кал/г·°C	дж/(кг·град)
Алмаз	700—900	973—1173	0,35	146,538	0,12	502,416
Эльбор	1400—1800	1673—2073	—	—	—	—
Карбид бора	500—700	773—973	0,04	16,7472	0,06	251,208
Карбид кремния	1200—1300	1473—1573	0,02	8,3736	0,228	954,5904
Электрокорунд	1500—1700	1773—1973	0,072	30,145	0,28	1172,304
Корунд	1400—1700	1673—1973	0,07	29,3076	0,2	837,36

Абразив	Температура плавления или разложения		Коэффициент термического расширения α·10 ⁻⁶ , 1/град	Удельное электрическое сопротивление	
	°C	°K		ом·см	ом·м
Алмаз	3700—4000	3973—4273	0,9—1,45	3·10 ¹³ —5·10 ¹⁴	3·10 ¹¹ —5·10 ¹²
Эльбор	3000	3273	2,1—2,3	2·10 ¹² —1·10 ¹²	2—1·10 ¹⁰
Карбид бора	2350	2623	4,5	0,445	4,45·10 ⁻³
Карбид кремния	2600	2873	5—7	3·10 ¹⁰ —3·10 ⁷	3·10 ³ —3·10 ⁵
Электрокорунд	1850—2050	2123—2323	7,5	10 ¹⁴ —10 ¹⁶	10 ¹² —10 ¹⁴
Корунд	2030	2303	5,4—8,4	10 ¹⁴ —10 ¹⁶	10 ¹² —10 ¹⁴

Природные алмазы бывают трех разновидностей: борт, баллас и карбонадо. Борт — мелкозернистый алмаз, неправильной формы, иногда с монокристаллическим ядром. Борт подразделяется на следующие разновидности: обыкновенный, магнитный, градиноподобный и фремит. Баллас — мелкозернистый плотный алмаз шаровидной формы; карбонадо — мелкокристаллический плотный агрегат округлой и неправильной формы с темной, непрозрачной поверхностью. Плотность природных алмазов изменяется в зависимости от разновидности: борта, балласа — 3,40—3,56 г/см³ (3400—3560 кг/м³), карбонадо — 3,01—3,42 г/см³ (3010—3420 кг/м³).

К о р у н д (условное обозначение Е) — минерал, представляющий собой кристаллическую окись алюминия (α-Al₂O₃). Корунд — анизотропный двупреломляющий материал. Его основные физико-механические и тепло-электрические свойства приведены в табл. 1 и 2. Твердость корунда по минералогической шкале Мооса равна 9, а по шкале Риджвея — 12; микротвердость достигает 2060 кг/мм² (20208,6 Мн/мм²); модуль упругости — 38 200 кг/мм² (347,742 Гн/мм²). Плотность корунда в зависимости от примесей изменяется от 3,82 до 4,28 г/см³ (от 3820 до 4280 кг/м³) и в среднем составляет 4,01 г/см³ (4010 кг/м³). Коэффициент теплопроводности корунда λ зависит от температуры: при 20 °C (293 °K) λ=0,07 кал/см·сек·град (29,3076 вт/(м·град)), а при повышении температуры до 1000 °C (1273 °K) его значение уменьшается в 5 раз и составляет 0,014 кал/см·сек·град (5,86152 вт/(м·град)). Удельная

теплоемкость его при этом возрастает и составляет: при 20 °C (293 °K) — 0,2 кал/г·град (837,36 Дж/(кг·град)), а при 1000 °C (1273 °K) — 0,26 кал/г·град (1088,568 Дж/(кг·град)). Коэффициент термического расширения корунда изменяется от $5,4 \cdot 10^{-6}$ до $8,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Значение его больше в направлении, параллельном оптической оси, чем в перпендикулярном. В зависимости от направления изменяются и прочностные параметры корунда.

Литературные данные по прочностным характеристикам корунда разноречивы. Так, по одним данным [8], прочность на сжатие монокристалла корунда параллельно оптической оси равна 304,2 кГ/мм² (2984,202 Мн/м²), перпендикулярно оптической оси — 147 кГ/мм² (1442,07 Мн/м²); прочность на изгиб перпендикулярно оптической оси — 36,77 кГ/мм² (360,7137 Мн/м²); по другим данным [9], прочность на сжатие параллельно оптической оси — 97,9—179,2 кГ/мм² (960,499—1757,952 Мн/м²), перпендикулярно оптической оси — 98,8—135,5 кГ/мм² (969,228—1329,255 Мн/м²); прочность на изгиб перпендикулярно оптической оси — 31,13—38,11 кГ/мм² (305,385—373,859 Мн/м²), параллельно оптической оси — 55,78—67,95 кГ/мм² (547,202—666,5895 Мн/м²).

Корунд устойчив при нагревании в широком интервале температур — от обычных до высоких степеней нагрева. Температура плавления его 2010—2030 °C (2283—2303 °K), размягчаться же корунд начинает при 1750 °C (2023 °K). Примеси снижают температуру плавления корунда. Температура плавления технического корунда несколько ниже приведенных выше значений и составляет 1900—1950 °C (2173—2223 °K).

В зависимости от содержания примесей корунд имеет различные свойства и цвет. Чистый корунд бесцветен. Примеси окрашивают его в красный, синий, голубой, серый, розовый и другие цвета. Примесь хрома окрашивает корунд в красный цвет (рубин), примесь титана дает синюю окраску (сапфир), трехвалентное железо — коричневую, а смесь трех- и двухвалентного железа — черную.

Корунды подразделяются на прозрачные и непрозрачные. К первым относятся рубин, сапфир, топаз, аметист, изумруд. Эти корунды применяются для изготовления ювелирных изделий, а также полупроводников. В абразивной промышленности используются непрозрачные корунды: обыкновенный, содержащий до 95% α -Al₂O₃, и наждак, содержащий от 12 до 60% α -Al₂O₃.

Природные корунды имеют мелкокристаллическое строение и «тонкую» зернистость. Поэтому в абразивной промышленности природный корунд применяется для производства микропорошков зернистостью М28—М7. Последние используются в свободном состоянии в виде паст и суспензий и для изготовления шлифовальной шкурки. Микропорошки применяются для тонкого шлифования, главным образом в шарикоподшипниковой и оптико-механической отраслях промышленности, где корунд дает наилучшую эффективность, особенно при полировке стекла. Абразивная способность корунда при шлифовании стекла равна 0,1.

Месторождения корунда имеются в СССР, Южной Америке, Индии, Канаде и других странах. В СССР основные запасы корунда приходятся

на месторождение Семиз-Бугу, лучшие сорта которого содержат 90% и выше α -Al₂O₃.

В настоящее время в связи с широким развитием производства искусственных корундов с более высокими режущими свойствами природный корунд имеет ограниченное применение. Он используется главным образом в виде порошков и паст для доводочных операций. Порошки, микропорошки и пасты из них применяются для доводки, притирки и полирования металлов, стекла и других материалов. Кроме того, естественный корунд иногда может использоваться и для полирования гальванопокрытий.

На ж д а к (условное обозначение Н) — это горная корундовая порода с примесью магнетита, гематита, кварца, шпинели, хлорита, гипса и т. д. Месторождения наждака имеются в СССР, Греции, Турции, США и других странах. Лучшие сорта отечественного корунда содержат 25—30% α -Al₂O₃ [10]. По сравнению с обыкновенным корундом наждак более хрупок, менее вязок и имеет меньшую твердость (7—8 по шкале Мооса). Его кристаллы остроугольной формы, при измельчении они дают зерна с острыми кромками. Однако и по абсолютной величине, и по стабильности режущие свойства наждаков значительно ниже режущих свойств корунда. Абразивная способность наждака при шлифовании стекла составляет 0,03—0,08. Из него изготавливают порошки и микропорошки, которые применяют главным образом для изготовления шлифовальной шкурки и бытовых абразивных брусков. Микропорошки и изготовленные из них пасты иногда используют для притирки совместно работающих деталей.

Г р а н а т (условное обозначение Гр) — минерал, представляющий собой алюмо(ферро-, хромо-)силикат извести, магнезии, марганца и железа [11]. В природе чаще всего встречаются следующие гранаты: альмандин — Fe₃Al₂(SiO₄)₃, пироп — Mg₃Al₂(SiO₄)₃ и спессартин — Mn₃Al₂(SiO₄)₃. Гранаты встречаются как в виде россыпей, так и в виде коренных месторождений. Гранаты россыпных месторождений имеют округлые формы зерна и непригодны для производства абразивных материалов. В качестве абразивного материала применяются преимущественно железоглиноземистые гранаты коренных месторождений. Твердость граната, по Моосу, 6,5—8. При дроблении граната коренных месторождений можно получить зерно осколочно-остроугольной формы. Зерна граната обладают свойством скалываться и расщепляться по мере затупления, что способствует их равномерному срабатыванию. Такое зерно характеризуется сравнительно высокой абразивной способностью и используется для доводки свободными (несвязанными) зернами и для производства шлифовальной шкурки. В свободном состоянии зерно применяется для шлифовки стекла. Абразивная шкурка, изготовленная из граната, используется для обработки твердых древесных пород, пластмасс, кожи, резины и т. п.

К в а р ц (условное обозначение Кв) — одна из наиболее распространенных в природе модификаций SiO₂ кристаллического строения. Кварц имеет стеклянный блеск; твердость, по Моосу, 7. Его удельный вес 2,5—2,8 г/см³ (2500—2800 кг/м³). Кварц оптически одноосный, положи-

тельный, обладает пьезо- и пирозлектрическим эффектом. Теплопроводность его в направлении оптической оси при 100°C (373°K) составляет $22,5 \text{ кал/сек}\cdot\text{см}\cdot\text{град}$ ($9420,3 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$), при 200°C (473°K) — $15,8 \text{ кал/сек}\cdot\text{см}\cdot\text{град}$ ($6515,144 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$), при 400°C (673°K) — $10,8 \text{ кал/сек}\cdot\text{см}\cdot\text{град}$ ($4521,744 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$), а в перпендикулярном направлении — соответственно 13,9; 10,1 и 7,8 $\text{кал/см}\cdot\text{сек}\cdot\text{град}$ ($5819,652$; $4228,668$ и $3265,404 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$) [7]. Удельное электрическое сопротивление кварца изменяется от 10^6 до $10^7 \text{ ом}\cdot\text{см}$ (от 10^4 до $10^5 \text{ ом}\cdot\text{м}$). Кварц — химически стойкий минерал. При комнатной температуре он практически не растворим в воде, соляной, азотной и серной кислотах, несколько менее устойчив к действию щелочей, особенно при нагревании. В природе кварц встречается в виде песка и гальки. Кварцевый песок более распространен, чем галька. Он бывает белого, желтого и других цветов. Кварцевый песок не имеет острых режущих кромок, поэтому его режущие свойства невысоки. В свободном состоянии кварц чаще всего применяется в виде песка для шлифования и полирования низкосортного стекла, а также для изготовления абразивной шкурки на полотне или на бумаге, которая используется для обработки дерева, кожи, резины и т. п. Некоторые исследователи предлагают применять кварц для грубого шлифования мягких материалов.

Молотый кварц, изготавливаемый способом помола чистого кварцевого песка до тонкодисперсного состояния, может применяться в качестве абразивного компонента в специальных подмазывающих пастах. Такой пылевидный кварц иначе называют маршалитом. Его физико-химические свойства регламентированы ГОСТ 9077—59. Особенно эффективно использование подмазывающих паст на маршалитовой основе при шлифовании абразивными лентами [13—15].

Кремнез (условное обозначение Кр) — плотная горная порода, состоящая из кристаллического и аморфного кремнезема SiO_2 . Содержание SiO_2 в кремне, применяемом для доводки, должно быть не менее 96%, а окиси кальция не более 1%. Излом кремня раковистый, цвет от желто-серого до черного. По твердости кремне примерно равен кварцу, однако его зерна имеют более острые режущие кромки, чем зерна кварца. В абразивной промышленности он используется главным образом для изготовления шлифшкурки, предназначенной для обработки пластмасс, дерева, кожи, резины. Режущие свойства кремневой шкурки несколько выше свойств кварцевой. Иногда кремне условно обозначают 81 кр.

Пемза — пористая, губчато-ноздреватая горная порода вулканического происхождения, содержащая 65—75% SiO_2 . Пористость пемзы достигает 80%, объемный вес ее 0,4—0,9, твердость по шкале Мооса 5—6, плавится примерно при 1400°C (1673°K), обладает малой теплопроводностью, плавают на воде, ее излом неровный, раковистый. Главнейшие месторождения пемзы в нашей стране приходятся на Армению.

Существует несколько видов пемзы, которые различаются по цвету: белая, серая, желтая и даже черная. Серая пемза имеет высокую пористость: поры ее большей частью пузыристые или пенные. Для белой пемзы характерна трубчатая форма пор.

Применяется пемза в виде зерна и порошков преимущественно для шлифовки и доводки мягких металлов, природных и синтетических смол, при полировке деревянных и металлических изделий, кожи и т. д. Кроме того, пемза в виде кусков используется при подготовке поверхности металлов под лакокрасочные покрытия.

Полевой шпат — группа наиболее распространенных в природе минералов. Свойства полевых шпатов изменяются в широких пределах в зависимости от их состава. Твердость полевого шпата по шкале Мооса 6—6,5; удельный вес 2,5—2,8 г/см^3 ($2500\text{—}2800 \text{ кг/м}^3$); цвет белый, розовый, красноватый, сероватый и т. д.; в кислотах, кроме фтористоводородной, не растворяется. В абразивной промышленности полевой шпат иногда используется в качестве абразивного материала для приготовления полировальных паст.

Тяжелый шпат (барит BaSO_4) — минерал. Природный сульфат бария содержит 65,7% BaO [16]. Твердость его — 3—3,5; удельный вес 4,3—4,5. Барит в чистом виде бесцветный водяно-прозрачный. Примеси окрашивают его в серый, желтый, зеленоватый, красный и другие цвета. Барит обладает значительной хрупкостью. Применяется он, хотя и довольно редко, в качестве абразивного материала в составе полировальных паст. Для превращения в полирующий материал барит, так же как и полевой шпат, тонко размалывают, отмучивают и сушат.

Крокус содержит до 75—97% окиси железа [17]. Его получают прокаливанием из высокосортного гематита (красного железняка). Крокус — тонкий полировальный материал, который применяется главным образом в качестве абразива в различных полировальных пастах. Такие пасты в настоящее время используются для полирования благородных металлов и некоторых оптических стекол.

Мел — осадочная мажущаяся белая горная порода, состоящая из тонкозернистых слабосцементированных частиц кальция. Размер частиц не превышает 10 мкм (в среднем 3 мкм). Его свойства определяются структурой; удельный вес составляет 2,65—2,7 г/см^3 ($2650\text{—}2700 \text{ кг/м}^3$); твердость, по Моосу, ниже 1; теплоемкость 0,204 $\text{кал/г}\cdot\text{град}$ ($854,1072 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$); теплопроводность 0,00065 $\text{кал/сек}\cdot\text{см}\cdot\text{град}$ ($0,272142 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$); температура диссоциации 925°C (1198°K). Кроме совершенно белого (белизна, по Оствальду, 75—90%), реже встречается желтоватый (примесь окислов железа) или сероватый (глинистая примесь) мел. Прокаленный мел адсорбирует не более 0,3% влаги из воздуха; в водной среде он легко диспергируется. В производстве мел подразделяется на комовой (кусковой) и молотый, а в зависимости от химического состава — на классы А, Б и В (ГОСТ 1498—64). Содержание углекислого кальция (CaCO_3) для мела класса А должно быть не менее 98%, класса Б — 95 и класса В — 90%.

Мел — тонкий полирующий материал, который широко используется для полирования благородных металлов, а также меди и ее сплавов. Кроме того, его можно применять для окончательной отделки (глянцевания) полированных поверхностей различных металлов.

Тальк — минерал, относящийся к группе гидросиликатов магния. По химическому составу он приближается к формуле $4\text{SiO}_2\cdot 3\text{MgO}\cdot \text{H}_2\text{O}$.

Твердость его по шкале Мооса равна единице; удельный вес $2,7—2,8 \text{ г/см}^3$ ($2700—2800 \text{ кг/м}^3$); имеет плохую электропроводимость и теплопроводность, но высокую кислото- и щелочностойкость; температура плавления 1530°C (1803°K), температура дегидратации $800—1000^\circ\text{C}$ ($1073—1273^\circ\text{K}$). Тальк химически инертен, но способен удерживать на поверхности своих частиц некоторые активные химические вещества; обладает скользкостью, мягкостью, жирностью и прилипаемостью. После термической обработки способен превращаться в плотный и прочный черепок.

Технические требования, которым должен соответствовать тальк, регламентированы ГОСТ 879—52. Согласно этому стандарту, тальк изготавливается четырех марок и нескольких сортов. В абразивной промышленности используется тальк марки Б, первого сорта, керамический. Как очень тонкий и мягкий абразивный материал тальк применяется для полирования гальванических покрытий как в виде микропорошка в свободном состоянии, так и в качестве абразивного компонента в полировальных пастах, а также для отделки мрамора.

Каолин — рыхлая горная порода белого цвета, состоящая в основном из минерала каолинита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). При нагревании до $550—600^\circ\text{C}$ ($823—873^\circ\text{K}$) каолин теряет воду и превращается в метакаолин. Твердость его, по Моосу, 1—2; удельный вес $2,58—2,6 \text{ г/см}^3$ ($2580—2600 \text{ кг/м}^3$). С водой каолин дает суспензии или пластичное тесто. Соляная и азотная кислоты на каолин почти не действуют, а серная, особенно при нагревании, легко его разлагает. Очищенный каолин — хороший полирующий материал, который применяется для изготовления специальных полировальных паст. Используются такие пасты для декоративного полирования цветных металлов (медь, латунь, хром, никель и т. д.). Для этих целей широко применяется каолин обогащенный Просяновского или Глуховецкого месторождений (ГОСТ 6138—61) в смеси с другими абразивными материалами, такими, как окись хрома, крокус, окись алюминия и т. д.

Диатомит (полировальный сланец) — рыхлая легкая горная порода, содержащая примеси глинистого и песчаного материала [18]. Диатомит имеет следующий химический состав: SiO_2 — 55—95%; Al_2O_3 — 0,1—10,5%; Fe_2O_3 — 0,2—10%; $\text{CaO} + \text{MgO}$ — 0,2—4% [19]. Твердость диатомита по шкале Мооса 1—3; удельный вес $2—2,2 \text{ г/см}^3$ ($2000—2200 \text{ кг/м}^3$); удельная теплоемкость $0,08—0,12 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$ ($334,944—502,416 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$); пористость достигает 92%. Диатомит обладает хорошей адсорбционной способностью. По цвету различают белый, желтоватый и светло-серый диатомит. В абразивной промышленности применяется тонкомолотый диатомит. Он используется в качестве абразивной составляющей в полировальных пастах, применяемых на отделочных операциях при обработке меди и ее сплавов, серебра, иногда стали и других металлов и мрамора.

Инфузорная земля — рыхлая горная порода, которая по составу, свойствам и применению тождественна диатомиту.

Трепел — землистая, кусковатая, но слабо связанная горная порода, которая по химическому составу близка к диатомиту. Его удель-

ный вес $2,2—2,5 \text{ г/см}^3$ ($2200—2500 \text{ кг/м}^3$); твердость по шкале Мооса 1—3; пористость 60—64%. В отличие от диатомита трепел интенсивно поглощает влагу, поэтому изготовленный из него абразивный микропорошок необходимо хранить в сухом помещении в закрытых емкостях. Используется трепел в качестве абразивного компонента полировальных паст, применяемых для окончательной отделки (глянцевания) стали, алюминия, меди и ее сплавов, серебра и других металлов.

Венская известь (известняк) — плотная горная порода беловатого, желтоватого, сероватого цвета, иногда окрашенная равномерно или пятнами в различные бурые, темно-красные цвета, средней твердости (нож оставляет заметную царапину). Состоит известняк преимущественно из минерала кальцита CaCO_3 (CaO — 56 и CO_2 — 44%). Венскую известь получают обжигом известняка и последующей очисткой его от примесей песка и глины. Содержание окиси кальция в ней должно быть не менее 94,5%, а влаги и уголекислоты — не более 2%. В качестве абразивного материала отбирают средние слои прокаленного известняка, так называемый сапик, который затем измельчают в шаровой мельнице и просеивают [10]. Перед дроблением отбирают крупные куски мягкой обожженной извести, которые используют для полирования при глянцевании. Как абразив венская известь применяется в виде микропорошков и паст из них при полировании благородных (серебра и изделий из него), цветных (никеля, латуни, алюминия) и других металлов для получения зеркальной поверхности. Венская известь хорошо поглощает находящиеся в воздухе уголекислый газ и влагу, превращаясь в мелкий белый порошок (пушонку), не обладающий какими-либо полирующими свойствами. Поэтому хранить ее нужно в герметичной таре.

Доломит — распространенный в природе минерал из группы карбонатов серовато-белого цвета, иногда с желтоватым, буроватым или зеленоватым оттенком, стеклянного или матового блеска. Его удельный вес $2,8—2,9 \text{ г/см}^3$ ($2800—2900 \text{ кг/м}^3$); твердость по шкале Мооса 3,5—4. В отличие от известняка соляная кислота разлагает крупнокристаллический доломит очень медленно, без «кипения», мелко- и тонкозернистый доломит вскипает слабо и не сразу, раздробленный в порошок — бурно. Из доломита изготавливают также тонкодисперсный порошок, который используется для полировки стекла и других материалов.

Турецкий абразивный порошок — природное соединение окисей алюминия и железа, который обладает высокой твердостью. Его зерна имеют округлую форму без впадин. Кроме того, они при работе истираются не раскалываясь и, следовательно, вновь не образуют острых режущих кромок. Поэтому абразивная способность такого порошка очень мала. В США и Англии турецкий абразивный порошок применяется в качестве абразивной составляющей полировальных паст, используемых для тонких полировальных работ. В СССР он не применяется.

Естественные абразивные материалы неоднородны по минералогическому составу. Посторонние примеси значительно снижают их качество. С развитием производства искусственных абразивных материалов применение естественных абразивов сократилось.

Отечественной промышленностью выпускаются следующие искусственные абразивные материалы: алмаз, эльбор (кубический нитрид бора), электрокорунды (белый, нормальный, хромистый, титанистый, циркониевый, монокорунд), карбид кремния (черный и зеленый), карбид бора, керметы, окись алюминия (глинозем). К искусственным абразивным материалам относятся также полировально-доводочные порошки: окись хрома, окись железа (крокус), огарок колчедана, пыль колчеданных огарков, кирпичная пыль, сапфировая пудра и бутылочное стекло.

Алмаз синтетический (условное обозначение АС) — абразивный материал, широко применяемый в промышленности. По своему строению, физико-механическим, теплоэлектрическим и химическим свойствам высококачественные синтетические алмазы почти не отличаются от природных (см. табл. 1 и 2), а по некоторым показателям и превосходят их.

Отечественной абразивной промышленностью синтетические алмазы выпускаются пяти марок: АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС. У шлифпорошков этих марок хрупкость уменьшается, а прочность увеличивается в последовательности: АСО→АСР→АСВ→АСК→АСС. Алмазы марок АСО имеют хорошо развитую, т. е. шероховатую, поверхность с острыми гранями [20]. «Степень» шероховатости других марок меньше. Из этих алмазов изготавливают различные инструменты, шлифовальные круги, шлифшкурки, пасты, порошки, микро- и субмикропорошки для тонких доводочных работ. Наши исследования [2, 84, 88 и др.] показали, что классификацию алмазного зерна и других сверхтвердых материалов целесообразно проводить по его форме.

Эльбор (условное обозначение Л) — новый перспективный абразивный материал. Называется он кубическим нитридом бора (КНБ), бороном или кубонитом. Отрицательным свойством алмаза, ограничивающим область его применения, является способность переходить в графит при повышенной температуре. Это побудило исследователей к созданию нового абразивного материала, который, обладая всеми преимуществами алмаза, имел бы в то же время более высокую температурную устойчивость. Таким материалом и явился эльбор. Эльбор менее хрупок, чем алмаз, имеет большую теплостойкость. Температура, при которой он может работать, достигает 1400—1800 °С (1673—2073 °К); плотность 3,45—3,54 г/см³ (3450—3540 кг/м³) (см. табл. 1). Удельная поверхностная энергия эльбора составляет около 4720 эрг/см² (4,72 дж/м²), что несколько меньше удельной поверхностной энергии алмаза, равной 5378 эрг/см² (5,378 дж/м²) [2].

Как и алмаз, эльбор обладает высокой химической устойчивостью. Он не травится в разбавленных и крепких концентрированных кислотах (соляной, серной, азотной, фосфорной, плавиковой), не поддается дей-

ствию растворов щелочей и сильных окислителей — смеси пергидроля с азотной кислотой и «царской водки». Эльбор корродирует при сплавлении со щелочами. Интенсивность разложения его возрастает с повышением температуры и уменьшением зернистости. При 700 °С (973 °К) наблюдается полное разложение микропорошка; шлифпорошок и шлифзерно разлагаются за это время частично. Эльбор в отличие от алмаза химически инертен к железу. Эта уникальная устойчивость его проявляется от обычных до высоких температур. Известно, что основной составляющей сталей и многих сплавов является железо. Высокая термостойкость и химическая инертность к железу позволяют широко применять эльбор при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов, особенно в закаленном состоянии. Эльбор имеет низкий коэффициент термического расширения $(2,1—2,3) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Этот коэффициент для эльбора в 1,5—2,5 раза больше, чем для алмаза. С повышением температуры численное значение коэффициента термического расширения эльбора увеличивается и при 400 °С (673 °К) составляет $3,4 \cdot 10^{-6}$, а при 700 °С (973 °К) — $4,0 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Основные физико-механические и теплоэлектрические данные эльбора приведены в табл. 1 и 2. Его микротвердость изменяется в пределах 7300—10 000 кг/мм² (71 613—98 100 Мн/м²) и составляет в среднем 8500—8600 кг/мм² (83 385—84 366 Мн/м²). По данным Всесоюзного научно-исследовательского института абразивов и шлифования (ВНИИАШ), абразивная способность эльбора зернистостью 10—12 при шлифовании стекла составляет 0,68—0,64 по отношению к абразивной способности естественного алмаза, принятого за единицу. Эти значения абразивной способности эльбора относятся только к шлифованию стекла в определенных условиях, их нельзя распространять на металлы. При шлифовании сталей эльбор по абразивной способности превышает естественный алмаз.

Карбид бора (условное обозначение КБ) представляет собой искусственный абразивный материал, получаемый в дуговых электропечах из борной кислоты и малозольного кокса (существуют и другие способы). Карбид бора (В₄С) характеризуется высокой твердостью, износостойкостью и абразивной способностью. Основные его свойства приведены в табл. 1 и 2. По твердости карбид бора уступает лишь алмазу и эльбору. Микротвердость его колеблется в пределах 4000—5000 кг/мм² (39 240—49 050 Мн/м²) и часто принимается равной 4950 кг/мм² (48559,5 Мн/м²).

Литературные данные по теплопроводности карбида бора противоречивы. Так, по данным работы [7], коэффициент теплопроводности для В₄С равен 0,04 кал/см·сек·град (16,7472 Вт/(м·град)); по другим данным [22], теплопроводность В₄С при 100 °С (373 °К) равна 0,29 кал/см·сек·град (121,4172 Вт/(м·град)). При этом с повышением температуры теплопроводность уменьшается и составляет при 300 °С (573 °К) 0,22 кал/см·сек·град (92,1096 Вт/(м·град)), а при 700 °С (973 °К) — 0,155 кал/см·сек·град (64,8954 Вт/(м·град)). Авторы работ [23, 24] принимают коэффициент теплопроводности карбида бора В₄С равным 0,025 кал/см·сек·град (10,467 Вт/(м·град)).

Удельная теплоемкость карбида бора возрастает с увеличением температуры и составляет при 20 °С (293 °К) 0,06 кал/г·град (251,208 Дж/(кг·град)), при 250 и 1350 °С (523 и 1623 °К) — соответственно 0,13 и 0,40 кал/г·град (544,284 и 1674,72 Дж/(кг·град)). Карбид бора характеризуется высокой химической стойкостью, не разлагается в холодных и нагретых разбавленных и концентрированных кислотах. Под действием смесей серной и азотной, а также плавиковой и азотной кислот карбид бора медленно разлагается. Другие смеси кислот почти не действуют на него. Термостойкость карбида бора 500—700 °С (773—973 °К). При более высоких температурах В₄С легко окисляется. Поэтому при абразивной обработке режимы следует назначать такими, при которых температура была бы не выше приведенных значений. Коэффициент термического расширения карбида бора при 20 °С (293 °К) равен $4,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, температура разложения 2350 °С (2623 °К).

Абразивной промышленностью карбид бора выпускается зернистостью от М28 до 16. Абразивная способность карбида бора при шлифовании стекла близка способности эльбора и синтетического алмаза (см. табл. 1). Следует отметить, что с увеличением номера зернистости абразивная способность возрастает. Из приведенных в табл. 1 значений абразивной способности большие относятся к крупным зернистостям, а меньшие — к мелким. Прочностные характеристики имеют противоположную зависимость: чем меньше размеры зерна, тем больше его прочность. В среднем прочность карбида бора при сжатии равна 180 кг/мм² (1765,8 Мн/м²), при изгибе — 30 кг/мм² (294,3 Мн/м²), модуль упругости — 29 600 кг/мм² (290,376 Гн/м²). На прочностные характеристики В₄С значительное влияние оказывает и температура: с повышением последней эти характеристики уменьшаются. Так, предел прочности на изгиб при нагревании на 1300 град уменьшается в 1,74 раза [25].

Карбид кремния (SiC), как и карбид бора, относится к группе химических соединений углерода с неметаллами и образуется восстановлением кремнезема углеродом [2]. Нашей промышленностью абразивный карбид кремния выпускается двух разновидностей (черный и зеленый), которые различаются содержанием примесей и структурой. Примеси азота, фосфора, железа и другие окрашивают карбид кремния в зеленый, светло-зеленый, желто-зеленый и желтоватый цвет, примеси кальция, алюминия, окиси кремния и другие — в голубой, фиолетовый, серый и черный. Более подробное рассмотрение структурных и других особенностей кристаллов карбида кремния приведено в работе [2].

Различие в структурном и химическом составах зеленого и черного карбида кремния проявляется в различии их некоторых физико-механических свойств. Эти карбиды отличаются по хрупкости, абразивной способности, проводимости и т. д. Карбид кремния зеленый (КЗ) по сравнению с черным (КЧ) имеет повышенную твердость и хрупкость [26]. Поэтому зерно КЗ обладает большей способностью давать острые режущие кромки, чем зерно КЧ. Абразивные инструменты с зерном КЗ лучше самозатачиваются, чем инструменты с зерном КЧ. При обработке твердых сплавов абразивная способность зерна КЗ на 15—25% выше, чем зерна КЧ.

Карбид кремния хрупок, поэтому он применяется для обработки материалов и сплавов с малым пределом прочности на разрыв, таких, как твердые сплавы, чугун, стекло, керамика. При обработке стекла абразивная способность карбида кремния в зависимости от его разновидности и зернистости изменяется от 0,25 до 0,45 (см. табл. 1). При этом карбид кремния зеленый имеет абразивную способность 0,28—0,45, а карбид кремния черный — 0,25—0,35.

Другие физико-механические характеристики карбида кремния приведены в табл. 1. Плотность его равна 3,16—3,39 г/см³ (3160—3390 кг/м³), микротвердость изменяется в интервале 2850—3600 кг/мм² (27958,5—35 316 Мн/м²) и составляет в среднем 3340 кг/мм² (32765,4 Мн/м²).

Прочностные характеристики карбида кремния изучены недостаточно, поэтому данные по этим параметрам часто противоречивы. Так, например, по одним данным [26, 27], его модуль упругости равен 11 600—14 500 кг/мм² (113,796—142,245 Гн/м²), по другим [7, 22, 28], — 39 400 кг/мм² (386,514 Гн/м²). Чем меньше размеры зерна, тем больше его прочность. По данным ВНИИАШ, механическая прочность зерен карбида кремния зернистостью 40 составляет около 90%, а зернистостью 16—95%. Прочность при сжатии карбида кремния равна 150 кг/мм² (1471,5 Мн/м²), прочность при изгибе — 15,5 кг/мм² (152,055 Мн/м²).

Карбид кремния, как и карбид бора, характеризуется высокой химической стойкостью. Он не растворяется даже в крепких разбавленных и концентрированных кислотах: серной, азотной и плавиковой. Только смесь последних двух и ортофосфорная кислота, а также хлор при повышенных температурах способны разлагать карбид кремния. При высоких температурах он разлагает окислы СаО, MgO, Fe₂O₃ и др. Интенсивно разлагается он и расплавленными щелочами, углекислыми солями и перекисями. При температурах свыше 1000 °С (1273 °К) карбид кремния может окисляться кислородом и взаимодействовать с серой. На окисление его значительное влияние оказывает не только время выдержки, но и размер зерна: мелкие зерна окисляются быстрее. Так, например, если зерно размером 100 мкм окисляется в кислороде при температуре 1300 °С (1573 °К) в течение 8 час на 1,9%, то при этих же условиях зерно размером 3,1 мкм — на 58,4% [29]. Имеются данные о том, что черный карбид кремния обладает большей стойкостью к окислению в кислороде, воздухе и смесях воздуха с водяным паром, чем зеленый.

Из теплофизических свойств карбида кремния отметим теплопроводность, теплоемкость, температуру плавления (разложения), термостойкость и коэффициент термического расширения (табл. 2). Из всех рассмотренных выше абразивных материалов карбид кремния имеет наиболее низкий коэффициент теплопроводности. Теплопроводность его при 100 °С (373 °К) равна 0,02 кал/см·сек·град (8,3736 Вт/(м·град)), что почти в 17 раз ниже теплопроводности алмаза. Поэтому при некоторых режимах абразивной обработки зерна карбида кремния не успевают охладиться и отвести тепло от режущей поверхности, т. е. тепло как бы аккумулируется на этой поверхности, способствуя ее разрушению. Однако, с другой стороны, такому тепловому разрушению препятствует высо-

кая теплоемкость карбида кремния. Коэффициент теплоемкости SiC наиболее высокий из всех рассмотренных выше абразивных материалов высокой твердости. При этом важно, что с повышением температуры он возрастает. Так, при 25 °С (298 °К) этот коэффициент равен 0,228 кал/г·град (954,5904 дж/(кг·град)), а при 1350 °С (1623 °К) — 0,66 кал/г·град (2763,288 дж/(кг·град)). Карбид кремния характеризуется высокой способностью релаксировать внутренние термические напряжения; его термостойкость 1200—1300 °С (1473—1573 °К). Температура разложения карбида кремния равна 2600 °С (2873 °К); коэффициент термического расширения изменяется в пределах $5 \cdot 10^{-6}$ — $7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Абразивные материалы из карбида кремния выпускаются промышленностью зернистостью от М3 до 200 следующих марок:

1) карбид кремния зеленый — шлифзерно К39 и К38, шлифпорошки К37 и К36, микропорошки К36;

2) карбид кремния черный — шлифзерно КЧ8 и КЧ7, шлифпорошки КЧ7 и КЧ5.

Цифра, следующая после наименования материала, обозначает процентное содержание карбида кремния, например, КЧ8 — карбид кремния черный с содержанием SiC 98%, КЧ7 — тот же карбид кремния, содержащий 97% SiC. В последнее время иногда применяют другое обозначение карбида кремния. Карбид кремния зеленый обозначают 64С, 63С; карбид кремния черный маркируют 55С, 54С, 53С.

Электрокорунд — искусственный абразивный материал. Запасы природного корунда и его качество не удовлетворяли потребностей машиностроения, поэтому было начато производство искусственного корунда, названного в отличие от природного электрокорундом. Электрокорунд представляет собой продукт плавки, основная составляющая часть которого — кристаллическая окись алюминия. При переходе из расплавленного в твердое состояние окись алюминия кристаллизуется в α -Al₂O₃ — твердое вещество белого цвета, уступающее по твердости только алмазу, эльбору, карбиду бора и карбиду кремния. В зависимости от содержания Al₂O₃ и примесей электрокорунд имеет различные цвет, структуру и свойства. Удельный вес его 3,93—4,16 г/см³ (3930—4160 кг/м³); твердость по шкале Мооса 9—9,1, по шкале Риджвея 12. Основные из этих свойств приведены в табл. 1 и 2.

В зависимости от исходных сырьевых материалов, технологии производства и содержания различных примесей и присадок абразивный электрокорунд подразделяется на следующие виды: нормальный Э, белый ЭБ, монокорунд М и легированные (хромистый ЭХ, титанистый ЭТ и циркониевый ЭЦ).

Электрокорунд нормальный содержит 91—96% α -Al₂O₃, бывает от розового до темно-коричневого цвета. С увеличением содержания α -Al₂O₃ его рабочие свойства улучшаются. По данным ВНИИАШ, абразивные инструменты из зерна с содержанием 95% α -Al₂O₃ работают значительно лучше, чем инструменты из зерна с содержанием 93% α -Al₂O₃. Однако нужно иметь в виду, что зерно с высоким содержанием α -корунда дороже, поэтому применять его следует в тех случаях, когда это экономически целесообразно.

Абразивные материалы из электрокорунда нормального выпускаются следующих марок: шлифзерно — Э5, Э4, Э3, Э2К и Э2, содержащие Al₂O₃ соответственно 95, 94% и т. д.; шлифпорошки и микропорошки — Э4, Э3 и Э2. Вместо такой маркировки для электрокорунда нормального Э5, Э4, Э3 и т. д. применяют соответственно следующее условное обозначение: 15А, 14А, 13А. По зернистости эти материалы, согласно ГОСТ 3647—59, подразделяются на 25 номеров — от М5 до 200.

Электрокорунд белый содержит 97—99% α -Al₂O₃. Белый электрокорунд выплавляют из высококачественного глинозема, поэтому по химическому и минералогическому составу он получается более однородным, чем нормальный. В сравнении с нормальным белый электрокорунд имеет повышенную микротвердость и хрупкость. Его абразивная способность выше, чем абразивная способность нормального электрокорунда, и при шлифовании стекла составляет 0,12—0,25 по отношению к абразивной способности естественного алмаза. Абразивная способность электрокорунда нормального при этих же условиях равна 0,12—0,16. Белый электрокорунд выпускается в виде шлифзерна, шлифпорошков и микропорошков марок Э9, Э9А и Э8 зернистостью от М5 до 200. Электрокорунд марки Э9А имеет повышенную механическую прочность, более высокое содержание α -корунда, чем Э9, и применяется для изготовления инструментов повышенного качества (класса А). Электрокорунд Э9 и Э8 обозначают соответственно 24А и 23А.

Монокорунд — одна из разновидностей электрокорунда, главная особенность которого заключается в том, что он получается не в виде кусков, подлежащих дроблению, а непосредственно в виде зерна. Монокорунд имеет высокую абразивную способность. Так, если абразивную способность электрокорунда нормального принять за 100%, то абразивная способность белого электрокорунда будет равна в среднем 108, а монокорунда — 139% [2]. В сравнении с белым и нормальным электрокорундом монокорунд обладает и большей на 5—15% механической прочностью. При обработке деталей из нержавеющей стали, бронзы, пластмасс, особенно при внутреннем шлифовании, инструменты, изготовленные из монокорунда, имеют более высокую режущую способность, чем инструменты из нормального и белого электрокорунда. Инструменты, изготовленные из монокорунда, характеризуются хорошей самозатачиваемостью и в процессе шлифования обеспечивают меньший нагрев детали. Работать монокорундовыми инструментами рекомендуется с относительно меньшим давлением на обрабатываемую деталь, чем инструментами из электрокорунда нормального. По данным ВНИИАШ, наиболее эффективно использование монокорундовых абразивных инструментов при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов. Эти инструменты рекомендуется применять также и там, где возникает опасность получения прижогов на обрабатываемой поверхности. Выпускается монокорунд марок М8 и М7 с содержанием α -корунда соответственно 98 и 97%. Введено и другое обозначение этих марок — 44А и 43А.

Более высокие абразивные свойства монокорунда определяются его строением, содержанием монокристаллического α -корунда. Если для электрокорунда нормального наиболее характерны поликристаллические

и осколочные зерна, то для зерен монокорунда — целые кристаллы. При этом монокорунд по сравнению с нормальным электрокорундом содержит и меньше примесей.

В зависимости от содержания α -корунда и примесей электрокорунд имеет различные цвет и свойства. В электрокорунде с малым содержанием примесей α -корунд кристаллизуется крупными кристаллами. По данным ВНИИАШ, уменьшение содержания α -корунда в электрокорунде с 98 до 91 % вызывает уменьшение размеров кристаллов соответственно с 2 до 0,4 мм. Крупные целые кристаллы имеют большую механическую прочность, чем аналогичные по размерам сростки кристалликов, т. е. поликристаллы. Прочность на сжатие и изгиб монокристаллов значительно выше, чем поликристаллов. Прочность на сжатие поликристаллического образца электрокорунда нормального состава составляет 75,7 кГ/мм² (742,617 Мн/м²), а его сопротивление изгибу — 8,72 кГ/мм² (82,5432 Мн/м²) [8]. Другие физико-механические характеристики электрокорунда приведены в табл. 1.

Микротвердость в зависимости от вида электрокорунда изменяется в пределах 1800—2780 кГ/мм² (17 658—27 271,8 Мн/м²). Микротвердость электрокорунда нормального 1800—2200 кГ/мм² (17 658—21 582 Мн/м²), электрокорунда белого 2400—2600 кГ/мм² (23 544—25 506 Мн/м²), монокорунда 2600—2780 кГ/мм² (25 506—27 271,8 Мн/м²). Модуль упругости электрокорунда изменяется в пределах 30 000—52 000 кГ/мм² (294,3—510,12 Гн/м²). Приведенные значения микротвердости относятся к обычным температурам. С повышением температуры микротвердость падает.

На физико-механические свойства абразивных материалов значительное влияние оказывают примеси. С увеличением примесей в электрокорунде его кристаллики становятся тонкими, менее прочными. Абразивный инструмент, изготовленный из тонкокристаллического электрокорунда, быстро изнашивается. Примеси способствуют повышению теплоемкости технического электрокорунда, которая по сравнению с чистым корундом возрастает и достигает 0,28 кал/г·град (1172,304 дж/(кг·град)), а температура плавления при этом снижается до 1900 °С (2173 °К) [30].

Размер кристаллов α -корунда определяется и процессом охлаждения выплавляемого электрокорунда. Быстрое охлаждение способствует получению мелкокристаллического α -корунда. Получению крупнокристаллического электрокорунда способствуют присадки окиси титана и окиси хрома. Так, например, при исследовании зерна 40 в монокорунде содержание монокристаллов составляло 39,3 %, а в электрокорунде хромистом — 68,2 % [31].

Электрокорунд хромистый — абразивный материал, получаемый при плавке в электропечах глинозема с добавлением хромистой руды. Окись алюминия (Al_2O_3) и окись хрома (Cr_2O_3), добавляемые при выплавке хромистого электрокорунда (ЭХ), относятся к одному типу химических соединений, имеют одинаковый тип кристаллической решетки, а эффективный радиус иона хрома, равный 0,65 Å (0,065 нм), не более чем на 15 % превышает эффективный радиус иона алюминия. Известно, что при соблюдении этих условий возможно образование смешанных кристал-

лов. Поэтому в α -корунде ионы алюминия могут изоморфно замещаться ионами хрома. Так, в рубинах хром входит в структуру корунда, изоморфно замещая ионы алюминия. Зерна электрокорунда хромистого имеют розовую окраску; содержание $\alpha-Al_2O_3$ в нем не менее 97 %. Электрокорунд хромистый обладает большим постоянством физико-механических свойств.

Добавка хрома повышает ударную вязкость и абразивную способность корунда, что позволяет «ужесточить» режимы шлифования и использовать корунд ЭХ для предварительного шлифования углеродистых, преимущественно незакаленных сталей. Электрокорунд же ЭБ предпочтителен для обработки закаленных сталей. По другим показателям, например микротвердости, механической прочности и т. д., электрокорунд хромистый примерно соответствует электрокорунду белому. В последнее время электрокорунд хромистый обозначают ЗЗА.

Электрокорунд титанистый получается при плавке в электропечах с добавлением соединений титана. Добавка титана способствует повышению прочности электрокорунда, что объясняется изменением кристаллической структуры материала. Эффективный радиус иона титана больше эффективного радиуса иона хрома, поэтому деформация кристаллической решетки корунда в электрокорунде титанистом значительно больше, чем в хромистом. При этом в отличие от хрома, растворяющегося с локально различной концентрацией, титан растворяется равномерно по объему материала и не образует в кристаллической решетке ликваций. В результате неоднородности структуры в электрокорунде хромистом кристаллическая решетка на участках с ликвациями деформируется больше, чем на остальных. В электрокорунде титанистом структура однородная и энергия связи между ионами выше, поэтому его прочность выше прочности хромистого на 15—20 %. Ввиду повышенной прочности и износостойкости изготовленных из электрокорунда титанистого абразивных инструментов последние могут успешно применяться на операциях, где требуется повышенная точность изделий.

Электрокорунд циркониевый. Положительно влияет на свойства электрокорунда и добавка окиси циркония. Окись циркония — высокотвердый абразивный материал, а электрокорунд, легированный ею, приобретает высокие прочностные характеристики. Используется циркониевый электрокорунд в смеси с электрокорундом нормальным или без него для изготовления абразивного инструмента, работающего при неравномерных нагрузках.

Окись алюминия (Al_2O_3 -глинозем) — мелкодисперсный белый абразивный материал, идущий на изготовление притирочных, доводочных и полировальных паст. Окись алюминия получают при обезвоживании гидроокиси алюминия. Абразивные свойства этого материала повышаются с увеличением содержания в нем Al_2O_3 . Твердость окиси алюминия, по Моосу, равна 4. Глинозем имеет высокую прочность, которая в сочетании с высоким сопротивлением износу обеспечивает повышенную износостойкость этого материала. Кроме того, при дроблении окиси алюминия получают зерна осколочно-остроугольной формы с острыми режущими кромками. Все это обеспечивает хорошие режущие свой-

ства окиси алюминия. Следует отметить и такое свойство ее, как способность адсорбировать связующие компоненты пасты. Пасты, изготовленные на основе окиси алюминия, используются для притирки и доводки стальных и чугуновых деталей, а также для доводки и полирования никеля и пластмасс. Кроме того, из окиси алюминия изготавливают доводочные бруски для обработки деталей с высоким классом шероховатости поверхности.

Окись железа (Fe_2O_3) (крокус) представляет собой мелкий однородный полировальный порошок коричневого цвета, состоящий в основном из кристаллической окиси железа. Искусственный крокус содержит ее не менее 75—85%. Лучшие сорта крокуса имеют фиолетовый оттенок. По сравнению с природным крокусом искусственная окись железа — более грубый абразивный материал. Способы изготовления ее приведены ниже.

1. Обжиг болотной руды. Этот дешевый способ был разработан акад. И. В. Гребенщиковым [32]. Болотная руда после обжига и отмучивания дает крокус высокой дисперсности с хорошей полирующей способностью. Однако наряду с положительными свойствами этого процесса отметим и его недостатки. В крокусе, полученном из болотной руды, всегда есть примесь песка, который трудно отделить.

2. Обжиг железного купороса $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Здесь важно правильно выдерживать температуру обжига. И. В. Гребенщиков установил, что между температурой обжига крокуса и количеством сполитованного в единицу времени материала (стекла) существует определенная зависимость. Оптимальная температура обжига крокуса составляет 650—700 °C (923—973 °K).

3. Обжиг железного купороса с добавкой соды в соотношении 2,5 : 1. Содовый крокус обеспечивает высокое качество полировки стекла, но имеет низкую абразивную способность, поэтому процесс полировки длится от 3 до 70 *час* [33]. Этот крокус применяют главным образом для полировки оптического стекла; обычные промышленные и бытовые стекла рекомендуется полировать крокусом из железного купороса, а заканчивать полировку крокусом, полученным содовым способом.

4. Получение сортов крокуса при переработке железного купороса и щавелевой кислоты. При правильном обжиге этот способ дает крокус наивысшего качества, но в связи с высокой стоимостью щавелевой кислоты применяется он только в оптической промышленности. Размеры частиц основной массы порошка находятся в пределах 0,1—1,5 *мкм*. Зерна крокуса недостаточно хрупки, и при полировке происходит их истирание и затупление, что ведет к постепенному снижению производительности обработки. Кроме того, искусственный крокус широко применяется для полирования благородных и цветных металлов и их сплавов.

Окись хрома (Cr_2O_3) — твердый тонкокристаллический абразивный материал. В зависимости от технологии получения он может быть темно-зеленого или почти черного цвета. Окись хрома — один из наиболее эффективных абразивных материалов, применяемых для изго-

товления полировальных паст. Полирующая способность порошка темно-зеленого и черного цвета несколько различна.

Получают окись хрома обжигом размельченного двуххромовокислого калия с серой в соотношении 10 : 2 [10, 17] или из бихромата натрия [34]. Плав, полученный при обжиге, затем измельчают и промывают в кипящей воде. Вместе с водой удаляются ионы SO_4 и другие водорастворимые соли. Осадок, полученный после промывки, тщательно отфильтровывают и прокаливают при температуре 200—300 °C (473—573 °K). Готовый продукт должен содержать не менее 98% Cr_2O_3 и не более 0,2% влаги. Правильно проведенная термообработка существенно повышает абразивную способность окиси хрома. Так, например, исследования В. Ф. Чурилкиной, проведенные еще в 50-х годах, показали, что окись хрома зернистостью М40, прокаленная при температуре 800 °C (1073 °K) в течение 1 *час*, в сравнении с аналогичной непрокаленной окисью позволяет повысить съем металла в 1,9 раза и уменьшить шероховатость обработанной поверхности на один класс — с 13-го до 14-го.

В нашей стране окись хрома производится на нескольких заводах. Для получения полировальных паст ГОИ применяют окись хрома, выпускаемую заводом «Хромпик». Окись хрома для паст ГОИ подвергают прокаливанию в графитовых тиглях в течение 5—6 *час*. Температура нагрева зависит от сорта пасты: для тонкой и средней пасты она равна 1000 °C (1273 °K), для грубой — 1500 °C (1773 °K). Следует заметить, что окись хрома, прокаленная при 1500 °C, получается в виде спекшихся кусков, которые затем дробятся в стальных шаровых мельницах. После классификации дробленой массы получают порошок темно-зеленого цвета.

Техническая окись хрома, которая также может применяться для полировочных процессов в часовой, приборостроительной и других отраслях промышленности, выпускается по ГОСТ 2912—66. Этим стандартом и последующими изменениями, внесенными в него, предусмотрен выпуск следующих марок и сортов окиси хрома: «металлургический» (ОХМ-1 и ОХМ-2), «пигментной» (ОХП-1 и ОХП-2), «пигментной светлой» (ОХПС-0, ОХПС-1 и ОХПС-2) и «часовой» (ОХЧ-1 и ОХЧ-2). Окись хрома марки «часовая» первого сорта должна обеспечивать класс шероховатости поверхности после полировки не менее 13-го.

Огарок колчедана (пиритный огарок) — материал, состоящий преимущественно из окиси железа. Получается он в виде отхода сернокислотного, бумажного и других производств при обжиге серного колчедана. По условиям обжига необходимо предварительное измельчение колчеданов, в результате чего колчеданные огарки получают в виде мелкозернистого порошка, из которого можно изготавливать полировальные пасты. Однако при изготовлении таких паст нужно тщательно отсеивать крупные частицы огарков.

Пыль колчеданных огарков — мелкозернистый порошок, сходный по составу с окисью железа. Вследствие значительной пылеватости серного колчедана при обжиге его образуется много пыли. Для предотвращения загрязнения окружающей среды эта пыль должна улав-

ливаться с помощью газоходов и фильтров. Аккуратно собранную пыль можно использовать в качестве абразивного полировального материала при обработке силикатного стекла.

К и р п и ч н а я п ы л ь — абразивный материал, получаемый из красного кирпича. Для обеспечения требуемой зернистости обломки или крошку красного кирпича размалывают в шаровых мельницах, а затем просеивают на специальных ситах. Попытка использовать кирпичную пыль в составе специальной шлифовальной пасты была предпринята на Горьковском автозаводе [36]. Пастами, изготовленными из кирпичной пыли, можно полировать детали из стали и цветных металлов.

С а п ф и р о в а я п у д р а — тонкий абразивный материал, предложенный В. К. Зарубиным и В. А. Париковым [37, 38]. Ее получают из алюмоаммиачных квасцов, азотнокислого кобальта и окиси магния в соотношении 1000 : 5 : 2. Компоненты растирают в ступке, перемешивая, а затем обжигают в муфельной печи в течение 8—10 *час*, соблюдая определенный график нагрева. До 1100 °C (1373 °K) температура поднимается в течение 3—5 *час*, в дальнейшем скорость нагрева уменьшается до 150 *град/час*. После достижения 1350 °C (1623 °K) обжиг прекращают. Массу, полученную после обжига, растирают и просеивают через сито № 0045 (ГОСТ 6613—73). Подготовленную таким способом сапфировую пудру используют при изготовлении паст для полирования цветных металлов.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛИРОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В последние годы в промышленности находят все более широкое применение специальные абразивно-полирующие материалы, такие, как окислы некоторых редких металлов (церия, тория, циркония), а также смеси окислов редкоземельных металлов (церия, лантана, неодима, празеодима и др.) с примесью кальция, бария, железа и прочих элементов. Весьма перспективно для отделочной обработки применение ферромагнитных порошков. Рассмотрим некоторые из них.

Д в у о к и с ь т о р и я (ThO_2) — кристаллический порошок желтого цвета. Его можно получать прокаливанием гидроокиси тория $\text{Th}(\text{OH})_4$ или органических солей тория, например оксалата тория $\text{Th}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Твердость ThO_2 по шкале Мооса 6,5; удельный вес 9,7 *г/см³* (9700 *кг/м³*); температура плавления 3050 °C (3323 °K); предел прочности при сжатии может достигать 150 *кг/мм²* (1471,5 *Мн/м²*), модуль упругости — 14 000 *кг/мм²* (137,34 *Гн/м²*); теплопроводность при 100 °C (373 °K) составляет 0,025 *кал/см·сек·°C* (10,467 *вт/(м·град)*); коэффициент термического расширения равен $9,2 \cdot 10^{-6}$ 1/*град*. Кристаллики двуокиси тория имеют форму четырехугольных пластинок размером около 10 *мкм*. Двуокись тория обладает высокой полирующей способностью (30—35 *ме* стекла за 30 *мин* полировки). Однако она не всегда обеспечивает требуемую при полировании шероховатость поверхности из-за отдельных углубленных царапин. Используется двуокись тория в ядерной, ракетной и некоторых других отраслях промышленности для быстрого уда-

ления следов шлифовки либо для обработки малоответственных деталей. В ограниченном количестве ее применяют и для обработки стекла.

Д в у о к и с ь ц е р и я (CeO_2) — белый порошок с розовым оттенком. Примеси окрашивают ее в желтоватый цвет. Двуокись церия образуется при прокаливании гидроокисей $\text{Ce}(\text{OH})_4$ и $\text{Ce}(\text{OH})_3$. Гидроокись $\text{Ce}(\text{OH})_4$ — более слабое основание, чем гидроокиси остальных редкоземельных элементов, что и используется для выделения церия из их смеси. Твердость CeO_2 по шкале Мооса 6; удельный вес 7,3 *г/см³* (7300 *кг/м³*); средняя удельная теплоемкость при 25 °C (298 °K) 0,0918 *кал/г·°C* (384,34824 *дж/(кг·град)*); коэффициент линейного расширения в интервале 100—500 °C (373—773 °K) равен $8,6 \cdot 10^{-6}$ 1/*град*. Прокаленная двуокись церия устойчива по отношению к соляной и азотной кислотам и едким щелочам, но растворяется в концентрированной серной кислоте. Двуокись церия имеет наивысшую полирующую способность (до 50 *ме*) по сравнению с другими порошками.

Д в у о к и с ь ц и р к о н и я (ZrO_2). Известно несколько кристаллических модификаций двуокиси циркония. Чистая ZrO_2 , представляющая собой белые кристаллики, в природе распространена в виде минерала бадделита. В производстве ее можно получать прокаливанием цирконилсерной кислоты. Однако в промышленности в большинстве случаев ZrO_2 производят из силиката циркония ZrSiO_2 . Для этого минеральное сырье измельчается, и с помощью нагретой соляной кислоты удаляются примеси. Очищенный продукт обрабатывается соляной кислотой или сплавляется со щелочами. В результате образуется сульфат циркония. Затем из раствора сульфата циркония осаждают гидроокись циркония, которая при обжиге превращается в двуокись циркония.

Кроме описанного способа, ZrO_2 из ZrSiO_2 можно получать путем восстановления силиката циркония углеродом. В этом случае в печи вначале образуется карбид циркония (ZrC), а затем при сжигании его на воздухе — ZrO_2 . Высокопроцентная окись циркония может быть получена обжигом органических солей четырехвалентного циркония. Обжигается ZrO_2 обычного приготовления при температуре 1300 °C (1573 °K). Затем продукт обжига дробится и классифицируется гидравлическим способом. Полирующая двуокись циркония может содержать до 0,06% SiC и до 6% SiO_2 (табл. 3).

Двуокись циркония имеет высокую температуру плавления — около 2700 °C (2973 °K). Ее удельный вес 5,6 *г/см³* (5600 *кг/м³*); твердость, по Моосу, 7; удельная теплоемкость при 20 °C (293 °K) составляет 0,12 *кал/г·°C* (502,416 *дж/(кг·град)*). С повышением температуры удельная теплоемкость и теплопроводность ZrO_2 несколько возрастают; теплопроводность при 100 °C (373 °K) равна 0,0038 *кал/см·сек·°C* (1,591 *вт/(м·град)*), а при 400 °C (673 °K) — 0,0045 *кал/см·сек·°C* (1,8839 *вт/(м·град)*); коэффициент термического расширения в интервале 30—1000 °C (303—1273 °K) составляет около $10 \cdot 10^{-6}$ 1/*град*. При низкой температуре двуокись циркония устойчива против различных восстановителей: на нее не действуют растворы едких щелочей, карбонатов и почти всех кислот (кроме концентрированной H_2SO_4 и HF).

Таблица 3

Химический состав некоторых отечественных и зарубежных полировальных материалов

Материал	Общая сумма редкоземельных окислов, не менее %	В том числе CeO_2 , %	Ориентировочное содержание других окислов, %							Прочие примеси, не более %
			Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	SO_3	BaO	ZrO_2	
Полирит (СССР)	97	До 50	0,05	0,5	0,5	0,1	—	—	—	2,7
Барнесайт (США)	93,5	60	—	0,1	—	0,9	—	3,7	—	1,8
Полирит (Швеция)	97,5	67	0,25	0,2	1	—	—	0,3	—	0,8
Двуокись циркония (Бельгия)	—	—	0,3	6	—	—	0,8	—	92	0,9
Крокус из окиси железа (США)	—	—	98,8	0,9	—	0,3	—	—	—	0,05
Крокус из окиси железа (ГДР)	—	—	96,7	2,4	—	—	—	—	—	1,1
Крокус из окиси железа (Бельгия)	—	—	95,5	1,7	—	2,3	—	—	—	0,5
Крокус из окиси железа, полученный содовым способом (СССР)	—	—	97	0,1—0,4	—	—	0,5—1,3	—	—	0,5

Большое сходство физико-химических свойств всех лантанидов затрудняет их разделение. Кроме того, исследованиями, проведенными в Институте стекла АН СССР и за рубежом, было установлено, что для полировки могут применяться материалы, содержащие не только чистые двуокиси церия, тория или циркония. Высокая производительность и качество поверхности могут быть достигнуты при использовании смеси окислов редкоземельных элементов.

Исходное сырье для производства большинства окисей редких земель — минерал монацит, который представляет собой безводный фосфат элементов цериевой группы с примесью окиси тория. Монацит содержит до 50—60% окисей редких земель (церия, лантана и т. д.). Содержание окиси тория обычно составляет около 5—10%. В природе монацит встречается главным образом в виде монацитового песка. Его месторождения имеются в Индии, Греции, Южной Америке и других странах. Усилиями ряда научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий в нашей стране были проведены исследования и налажено производство полирующего порошка из смеси окислов редкоземельных металлов, выпускаемого под названием «полирит». Для его производства могут использоваться концентраты от переработки лопаритовых и апатитовых руд. В лучших сортах этих сырьевых материалов содержится до 55% CeO_2 и до 45% других редкоземельных элементов.

Исходное сырье обогащают, размалывая в мелкую крошку, и обрабатывают серной кислотой или щелочами. В соответствии с этим существуют два способа получения окисей редких земель: кислый и щелоч-

ной. При кислом способе фосфаты редких земель, содержащиеся в монацитовом сырье, с помощью кислоты переводят в сульфаты, которые можно экстрагировать водой. Торий, имеющийся в монацитовом сырье, выделяется с помощью пирофосфата натрия в виде нерастворимого фосфата или основной соли, выделенной щелочью. Из раствора сульфата, оставшегося после сепарации тория, осаждают редкие земли, которые отфильтровывают, а затем обжигают. В итоге получают смесь окислов редких земель, содержащих, кроме двуокиси церия, окиси лантана, неодима и празеодима.

При щелочном способе монацитовую крошку обрабатывают горячим водным раствором едкого натрия. В результате получают нерастворимые гидроокиси и раствор фосфата натрия. Затем на эти вещества действуют соляной кислотой. Хлориды редких земель растворяются, а гидроокись тория выпадает в осадок. Раствор хлоридов редких земель — промежуточный продукт при получении цериевых полировочных порошков.

С добавлением хлора и едкого натрия при определенном значении pH происходит образование гидроокиси церия, которая выпадает в осадок. Ее отделяют от растворимых хлоридов других редких земель, фильтруют и сушат. Полученная гидроокись церия имеет мелкокристаллическую структуру. При обжиге из нее образуется порошок двуокиси церия, содержащий около 90% CeO_2 .

При осаждении хлористого раствора углекислым натрием получают карбонаты редких земель, которые в результате дальнейшего обжига разлагаются. Образуется смесь окисей редких земель, содержащая около 40—50% CeO_2 и 50—60% окисей лантана, неодима, празеодима и др. Аналогичная смесь может быть получена и другими способами, например гидроксидным или аммиачным осаждением гидроокиси редких земель и последующим кальцинированием [39].

В Чехословакии полировочные материалы на основе окиси церия готовят из щавелевокислого церия [39]. Щавелевокислый церий обжигают при температурах, близких к 900 °С (1173 °К), в результате образуется двуокись церия, которая затем охлаждается. Темп охлаждения назначается в зависимости от марки двуокиси церия. Таким способом получают две марки окиси церия: прокаленную и обыкновенную. Прокаленная окись церия после обжига охлаждается быстро, а обыкновенная — медленно. Полученная масса, измельчаясь, просеивается на мелких ситах. Полировочный порошок с содержанием около 45% называется «Церка».

Американская фирма «Витро Кемикал Компани» щелочным способом производит две марки полировочного порошка: «Витрокс С» и «Витрокс R», содержащих соответственно 90 и 45% CeO_2 . Кроме химического состава, их производство отличается температурой обжига: «Витрокс R» обжигается при 980 °С (1253 °К), а «Витрокс С» — при 1040—1090 °С (1313—1363 °К).

В СССР основным полирующим материалом, применяемым при производстве высококачественных оптических стекол, является полирит.

Полирит представляет собой мелкодисперсный порошок коричневого цвета с разными оттенками. Он содержит от 40 до 50% CeO_2 , остатки составляют окиси других редких земель; твердость, по Моосу, 6—7, получают его карбонатным способом. Высокими полирующими качествами обладает и полирит, полученный из оксалата церия $\text{Ce}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$. По техническим условиям на производство общее содержание окислов редких земель в полирите должно быть не менее 97%. Ориентировочный химический состав полирита в сравнении с другими полировочными материалами приведен в табл. 3. Зерна полирита имеют форму удлиненных пластинок длиной до 5 мкм. В процессе полировки такие пластинки дробятся на более мелкие остроугольные частицы.

Полирит обеспечивает высокое качество обработки и обладает хорошей полирующей способностью, достигающей 30—40 мг. Его полирующая способность в 2 раза выше, чем крокуса. По полирующей способности отечественные марки полирита не уступают подобным зарубежным материалам. Для увеличения твердости и полирующей способности большое значение имеет температура обжига. Для полирита она равна 980—1200 °C (1253—1473 °K), а для крокуса — около 800 °C (1073 °K). При производстве полирита целесообразно заранее знать, где он будет применяться, так как от его назначения зависит и температура обжига. Для полирита, применяемого в оптической промышленности, оптимальной является температура 1050—1100 °C (1323—1373 °K). Иногда целесообразно применять двухступенчатый обжиг: первый при температуре 550 °C (823 °K), а второй при 1050—1100 °C (1323—1373 °K) [39]. Двухступенчатый обжиг позволяет повысить полирующую способность полирита.

Качество полирита зависит и от содержания примесей, особенно окиси кальция, с которой при обжиге CeO_2 образует твердые царапающие частицы. Поэтому содержание CaO не должно превышать 1%. В зависимости от содержания царапающих примесей полирит бывает двух сортов. Полирит первого сорта обеспечивает менее шероховатую полированную поверхность оптических деталей, чем полирит второго сорта.

Барнесайт — твердый порошок темно-коричневого цвета, который, подобно отечественному полириту, представляет собой смесь окислов редкоземельных элементов. Его химический состав приведен в табл. 3. Характерная особенность барнесайта — кристаллическая структура. Кристаллики имеют шестигранную форму, чаще несколько вытянутую в одном направлении. Размеры основной массы кристалликов 5—10 мкм, однако отдельные пластинки могут достигать 20—40 мкм. В процессе работы такие кристаллики дробятся на более мелкие частицы остроугольной формы. По зерновому составу барнесайт весьма однороден, полирующая способность его 30—35 мг. Получен и производится этот материал в США. Аналогичный барнесайту полировочный материал выпускается в Англии, Швейцарии и Швеции. Однако по структуре полировочные материалы этих стран отличаются от американского барнесайта.

Ферромагнитные порошки — абразивные порошки, изготовленные из керамико-металлических материалов (керметов). Возмож-

но образование нескольких различных композиционных сплавов металла и керамики. Однако в абразивной обработке распространение получили сплавы, которые обладают магнетизмом, например ферробор, бористый чугун с высоким содержанием бора, ферровольфрам, ферромарганец, ферросилицит, ферриткорунд, сплавы ПЖ-1—ПЖ-5, МАМ-20, МАМ-40, алсифер и др. [40]. Такие сплавы в большинстве случаев получают спеканием абразивных или металлических порошков с железными. Используются ферромагнитные порошки при новом способе чистовой и отделочной обработки деталей — магнитно-абразивной.

2. Доводочные порошки

При доводке (притирке) и полировании широко применяют как естественные, так и искусственные абразивные материалы. В соответствии с ГОСТ 3647—71 зерна абразивных материалов (кроме алмазных и эльборовых) по крупности подразделяются: шлифзерна — 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16; шлифпорошки — 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3; микропорошки — М63, М50, М40, М28, М20, М14, М10, М7 и М5. В доводочных и отделочных процессах могут использоваться микропорошки, шлифпорошки и некоторые номера шлифзерна. Однако наибольшее применение имеют микропорошки.

М10—М5 составляют группу тонких микропорошков. В настоящее время ассортимент по корундовым микропорошкам расширен до М0,3 и по карбиду кремния до М3. Эти микропорошки относятся к особо тонким; применяются главным образом в свободном виде на точных доводочных и полировальных операциях. Размерные характеристики тонких микропорошков стандартами не регламентируются, и изготавливаются они по специальным техническим условиям. Для производства микропорошков зернистостью М3—М0,3 ВНИИАШ разработан новый технологический процесс производства и создано соответствующее оборудование.

Классификация микропорошков М63—М14 осуществляется на точных линиях по принципу «от крупного к мелкому»; микропорошков М10—М5 — классификацией в автоматических седиментаторах; микропорошков М3—М0,3 — классификацией с использованием центробежного поля, ускоряющего процесс в сотни раз.

Каждый номер зернистости характеризуется следующими фракциями: предельной, крупной, основной, комплексной и мелкой (первой и второй). Комплексная фракция для шлифзерна и шлифпорошков состоит из трех (крупной, основной и смежной), а для микропорошков — из двух (основной и смежной). Номер зернистости от 200 до 3 (включительно) определяется размером сторон ячеек контрольных сит. Одним из основных показателей является крупность основной фракции, значения которой для продуктов рассева (девяти зернистостей) и для продуктов гидроклассификации приведены в табл. 4. Анализ данных таблицы показывает, что для продуктов рассева номер зернистости устанавли-

ливается по нижнему значению крупности основной фракции, а для продуктов гидроклассификации — по верхнему.

Содержание основной фракции в готовой продукции может быть различным. В зависимости от процентного содержания основной фракции (при соблюдении норм по остальным фракциям) к номеру зернистости может добавляться буквенный индекс согласно табл. 5. Содержание отдельных фракций изменяется в определенных пределах в зависимости от зернистости и способа классификации. Так, например, для шлифзерна зернистостей с индексами П и Н предельная фракция не допускается, а с индексом Д ее содержание должно быть не более 0,3%; содержание крупной фракции — не более 15—22 для шлифзерна и шлифпорошка, 12—30 для микропорошка и 20—33% для тонкого микропорошка. Ограничивается содержание и мелкой фракции — должно быть не более 2—21% (для микропорошка 3—10, тонкого микропорошка 5—12%). При этом для всех групп нижние границы относятся к зернисто-

стям с индексами В и П, а верхние — с Д и Н. Соответственно для зернистостей с индексами В и П устанавливается более высокое содержание основной и комплексной фракций. В комплексную фракцию входят основная и две ближайшие по одной с каждой стороны. Порошки и зерно с индексами В и П наиболее однородны и высококачественны.

Согласно ГОСТ 9206—70, порошки, изготавливаемые из природных и синтетических алмазов и применяемые для производства алмазного инструмента, паст и суспензий, подразделяются на две группы: шлифпорошки, получаемые рассевом на ситах с контролем зернового состава ситовым методом, и микропорошки, получаемые классификацией с использованием жидкости и контролем зернового состава микроскопическим методом.

Зерновой состав порошков характеризуется совокупностью фракций: основной, преобладающей по количеству, и побочных — крупной и мелкой, выраженных в процентах (шлифпорошков — по массе, микропорошков — по числу зерен). Размер зерен в каждой фракции шлифпорошков определяется размерами сторон ячеек двух контрольных сит, располагаемых одно над другим. Размер сторон ячеек сит выражается в микрометрах и должен соответствовать ГОСТ 3584—73. Через верхнее сито зерна должны проходить, а на нижнем задерживаться. Время рассева шлифпорошков зависит от массы зерен — для контрольных проверок для всех зернистостей оно устанавливается равным 10 мин.

Зернистость шлифпорошка характеризуется основной фракцией и обозначается дробью, где числитель — размер стороны ячейки верхнего, а знаменатель — нижнего сита. По зернистости шлифпорошки из природных и синтетических алмазов выпускаются двух диапазонов: широкого и узкого. Широкий диапазон охватывает 5 (400/250, 250/160, 160/100, 100/63 и 63/40), а узкий — 12 зернистостей (630/500, 500/400, 400/315, 315/250, 250/200, 200/160, 160/125, 125/100, 100/80, 80/63, 63/50 и 50/40).

Шлифпорошки из природных алмазов выпускаются марки А, которая используется в инструментах на металлических и органических связках. Шлифпорошки этой марки выпускаются всех зернистостей. Шлифпорошки из синтетических алмазов отечественной промышленности выпускаются пяти марок: АСО, АСР, АСВ, АСК и АСС. Порошки марки АСО имеют наиболее развитую, т. е. шероховатую поверхность, повышенную хрупкость и рекомендуются для изготовления инструментов только на органических связках. По зернистости зерна этой марки выпускаются трех значений в широком диапазоне (160/100, 100/63 и 63/40) и шести значений в узком (от 160/125 до 50/40). Порошки марки АСР характеризуются меньшей хрупкостью и большей прочностью по сравнению с порошками марки АСО и рекомендуются для изготовления инструментов на керамических и металлических связках. По зернистости шлифпорошки этой марки выпускаются четырех значений в широком диапазоне (от 250/160 до 63/40) и восьми значений в узком (от 250/200 до 50/40). Зерно марки АСВ имеет еще меньшую хрупкость и большую прочность, чем зерно марки АСР. Порошки марки АСВ рекомендуются для изготовления инструментов на металлических связках,

Таблица 4

Размеры зерен основной фракции для различных зернистостей

Для продуктов рассева		Для продуктов гидроклассификации	
номер зернистости	крупность основной фракции, мкм	номер зернистости	крупность основной фракции, мкм
20	250—200	M63	63—50
16	200—160	M50	50—40
12	160—120	M40	40—28
10	120—100	M28	28—20
8	100—80	M20	20—14
6	80—60	M14	14—10
5	60—50	M10	10—7
4	50—40	M7	7—5
3	40—30	M5	5—3

Таблица 5

Содержание основной фракции, %, для зернистостей с различным индексом

Индекс	Шлифзерно		Шлифпорошок			Микропорошки		Тонкие микропорошки
	200—32	25—16	12—8	6—4	3	M63—M28	M20—M14	
В	—	—	—	—	—	60	60	55
П	55	55	55	55	—	50	50	45
Н	45	43	45	40	40	45	40	40
Д	41	39	41	36	36	42	37	37

работающих при повышенных удельных нагрузках. По зернистости шлифпорошки этой марки выпускаются всех значений в широком диапазоне и 10 значений в узком (от 400/315 до 50/40). Зерно марки АСК имеет меньшую хрупкость и большую прочность по сравнению с зерном марок АСО, АСР и АСВ. Зерно и порошки этой марки рекомендуются для изготовления инструментов на металлических связках, работающих в особо тяжелых условиях, например при резке и обработке гранита, мрамора и т. д. Шлифпорошки этой марки классифицируются только по узкому диапазону зернистостей и выпускаются 11 значений (от 500/400 до 50/40). Алмазы марки АСС имеют наибольшую прочность по сравнению с порошками всех рассмотренных марок и рекомендуются для изготовления бурового инструмента, правки абразивных кругов и резки корунда. Классификация алмазов этой марки производится только по узкому диапазону, в котором они выпускаются всех зернистостей.

Качество шлифпорошков из природных алмазов характеризуется зерновым составом, а шлифпорошков из синтетических алмазов — зерновым составом и прочностью на сжатие. Зерновой состав алмазных шлифпорошков приведен в табл. 6. Прочность на сжатие шлифпорош-

Таблица 6

Зерни- стость	Зерновой состав шлифпорошков			
	Фракция			
	крупная		основная	мелкая
	должно про- ходить через сито 100%	может задер- живаться на сите не более 15%	должно задер- живаться на сите не менее 70%	может прохо- дить через си- то не более 3%
номинальный размер стороны ячейки, мкм				

Широкий диапазон зернистостей				
400/250	500	400	250	200
250/160	315	250	160	125
160/100	200	160	100	80
100/63	125	100	63	50
63/40	80	63	40	—

Узкий диапазон зернистостей				
630/500	800	630	500	400
500/400	630	500	400	315
400/315	500	400	315	250
315/250	400	315	250	200
250/200	315	250	200	160
200/160	250	200	160	125
160/125	200	160	125	100
125/100	160	125	100	80
100/80	125	100	80	63
80/63	100	80	63	50
63/50	80	63	50	40
50/40	63	50	40	—

Таблица 7

Прочность на сжатие, кг (н), синтетического алмазного порошка различных марок

Зернистость	Марка шлифпорошка				
	АСО	АСР	АСВ	АСК	АСС
Широкий диапазон зернистостей					
400/250	—	—	1,18(11,6)	—	—
250/160	—	0,64(6,3)	0,83(8,1)	—	—
160/100	0,2(2,0)	0,44(4,3)	0,60(5,9)	—	—
100/63	0,17(1,7)	0,32(3,1)	0,45(4,4)	—	—
63/40	0,15(1,5)	0,25(2,4)	0,38(3,7)	—	—
Узкий диапазон зернистостей					
630/500	—	—	—	—	6,6(64,7)
500/400	—	—	—	2,7(26,5)	5,4(53,0)
400/315	—	—	1,30(12,7)	2,3(22,5)	4,6(45,1)
315/250	—	—	1,06(10,4)	1,9(18,6)	3,8(37,3)
250/200	—	0,7 (6,9)	0,90(8,8)	1,6(15,7)	3,2(31,4)
200/160	—	0,58(5,7)	0,77(7,6)	1,4(13,7)	2,9(28,4)
160/125	0,22(2,2)	0,48(4,7)	0,66(6,5)	1,2(11,8)	2,4(23,5)
125/100	0,2 (2,0)	0,40(3,9)	0,56(5,5)	1,0(9,8)	2,0(19,6)
100/80	0,18(1,8)	0,35(3,4)	0,48(4,7)	0,9(8,8)	1,7(16,7)
80/63	0,17(1,7)	0,29(2,8)	0,43(4,2)	0,8(7,8)	1,5(14,7)
63/50	0,16(1,6)	0,26(2,5)	0,40(3,9)	0,7(6,9)	1,3(12,7)
50/40	0,15(1,5)	0,24(2,4)	0,37(3,6)	0,6(5,9)	1,2(11,8)

ков из синтетических алмазов различных марок должна быть не менее указанной в табл. 7.

Алмазные микропорошки выпускаются двух марок из синтетических алмазов (АСМ и АСН) и двух марок из природных (АМ и АН). Микропорошки марок АСМ и АМ характеризуются нормальной абразивной способностью. Эти марки целесообразно использовать для изготовления инструмента, паст и суспензий, применяемых при обработке твердых сплавов, закаленных сталей, стекла и других твердых материалов. Микропорошки марок АСН и АН обладают повышенной абразивной способностью. Эти марки рекомендуется использовать для изготовления инструмента, паст и суспензий, применяемых при обработке сверхтвердых хрупких труднообрабатываемых материалов, природных и синтетических алмазов, корундов, специальной керамики, кварца и т. д.

Зерновой состав микропорошков определяется линейными размерами проекции зерен под микроскопом. При этом за размер зерна при микроскопическом методе анализа принимается полусумма длины и ширины прямоугольника, условно описанного вокруг проекции зерна. На проекции находится наибольший размер, который и принимается за большую сторону прямоугольника.

Зернистость микропорошка, подобно шлифпорошкам, обозначается дробью, у которой числитель соответствует наибольшему, а знаменатель — наименьшему размерам зерен основной фракции. Однако в от-

личие от шлифпорошков качество микропорошков характеризуется зерновым составом, абразивной способностью и шероховатостью обработанной ими поверхности. Эти параметры применяются для оценки качества синтетических и природных микропорошков. Зернистость алмазных микропорошков и их зерновой состав приведены в табл. 8.

Стандарт регламентирует содержание в алмазных микропорошках и некоторых дефектных зерен. Так, например, количество пластинчатых и удлинённых зерен, величина которых превышает наибольший размер зерна основной фракции не более чем в 1,5 раза, допускается не свыше 2%.

Один из основных параметров, характеризующих качество абразивного материала,— абразивная способность, т. е. способность абразивного материала обрабатывать другие материалы. Абразивная способность шлифзерна и шлифпорошков определяется при шлифовании стеклянного диска. Абразивные зерна одного и того же гранулометрического состава, расположенные между двумя вращающимися в разных направлениях дисками, сошлифовывают за установленное время некоторое количество материала, которое и принимается за критерий абразивной способности обрабатываемого материала. Абразивная способность порошка характеризуется слоем металла, снятого с образца в единицу времени.

Абразивная способность микропорошков определяется на специальных установках. В нашей стране такие установки разработаны для определения абразивной способности алмазных микропорошков в Украинском научно-исследовательском институте сверхтвёрдых материалов (УкрНИИСМИ) (установка УАС-2М) и во ВНИИАШ (установка типа прибора Миндта). В качестве образцов при определении абразивной способности алмазных микропорошков применяют синтетический корунд в виде прямоугольных призм с основанием 10×10 мм. Основание должно быть ориентировано параллельно оптической оси.

Таблица 8

Зернистость и зерновой состав алмазных микропорошков			
Зернистость	Содержание фракций по количеству зерен		
	крупной, не более 5%	основной, не менее 65%	мелкой, не более 30%
	размер зерен, мкм		
60/40	80—60	60—40	40—20
40/28	60—40	40—28	28—14
28/20	40—28	28—20	20—10
20/14	28—20	20—14	14—7
14/10	20—14	14—10	10—5
10/7	14—10	10—7	7—3
7/5	10—7	7—5	5—2
5/3	7—5	5—3	3—1
3/2	5—3	3—2	2 и мельче
2/1	3—2	2—1	1 и мельче
1/0	2—1	От 1 и мельче, не менее 95%	—

Таблица 9

Марка микропорошка	Норма абразивной способности при зернистости, не менее, мг							
	60/40	40/28	28/20	20/14	14/10	10/7	7/5	5/3
АМ, АСМ	3,3	3,3	3,2	3,0	2,7	2,3	1,8	1,2
АН, АСН	4,3	4,3	4,2	4,0	3,6	3,2	2,7	1,9

Таблица 10

Шероховатость поверхности твердого сплава марки Т15К6 или ВК6 после обработки микропорошками различных зернистостей

Зернистость	Класс и разряд шероховатости поверхности (не ниже) при обработке		Зернистость	Класс и разряд шероховатости поверхности (не ниже) при обработке	
	механической	ручной		механической	ручной
60/40	9б	9в	7/5	Ч16	12б
40/28	9в	10а	5/3	11в	12в
28/20	10а	11а	3/2	12а	13б
20/14	10б	11б	2/1	12б	13в
14/10	10в	11в	1/0	12в	14а
10/7	11а	12а			

Абразивная способность алмазных микропорошков соответствует значениям, приведенным в табл. 9.

При обработке алмазными микропорошками образцов из твердого сплава марки Т15К6 или ВК6 должна быть получена шероховатость поверхности, приведенная в табл. 10. При этом следует учитывать, каким способом будет выполняться обработка: ручным или механическим. Применение механического и ручного способов доводки дает расхождение результатов в пределах 1—4-го разрядов.

Абразивные порошки из кубического нитрида бора, выпускаемые в нашей стране в промышленных масштабах на Опытном заводе УкрНИИСМИ под названием кубонит и на Ленинградском абразивном заводе «Ильич» под названием эльбор, имеют различные условные обозначения и зернистость. Разница в названиях и обозначениях отчасти объясняется некоторыми различиями в технологии их производства. Целесообразно ускорить разработку ГОСТ на эти порошки с единым обозначением. Пока же эти порошки выпускаются по ведомственным техническим условиям: эльбор регламентирован МРТУ 2-036-1-68, а кубонит — ТУ 258-66.

Согласно техническим условиям, эльбор выпускается двух марок: ЛО — обычной механической прочности с обычным содержанием основной фракции; ЛП — повышенной механической прочности с увеличенным содержанием основной фракции. Подразделяется эльбор на три группы зернистостей: шлифзерно (Л25, Л20 и Л16), шлифпорошки

(Л12, Л10, Л8, Л6, Л5, Л4) и микропорошки (ЛМ40, ЛМ28, ЛМ20, ЛМ14, ЛМ10, ЛМ7, ЛМ5, ЛМ3, ЛМ2, ЛМ1). Каждая из этих зернистостей определяется пятью фракциями: предельной, крупной, основной, дополнительной к основной и мелкой. Во всех зернистостях содержание предельной фракции не допускается; крупной фракции для зернистостей Л25—Л4 и ЛМ3—ЛМ1 должно быть не более 10%, ЛМ40 — не выше 5, а для ЛМ28—ЛМ5 — не более 10; основной фракции для всех зернистостей (кроме ЛМ3 и ЛМ1) должно быть 60%, ЛМ3 — 65, для ЛМ1 — 90%; дополнительной к основной для всех зернистостей шлифзерна и шлифпорошков и микропорошка ЛМ3 должно быть не более 25%, для всех остальных микропорошков — не более 30% (в микропорошке ЛМ1 этой фракции не должно быть); содержание мелкой фракции для всех зернистостей Л25—ЛМ40 должно быть не выше 5%, а для остальных микропорошков (кроме ЛМ3 и ЛМ1) — не более 9%. В микропорошках ЛМ3 и ЛМ1 содержание мелкой фракции не допускается.

Главная размерная характеристика каждой зернистости — основная фракция. Размеры зерен основной фракции на эльборовые шлифпорошки, шлифзерно и микропорошки соответствуют алмазным порошкам, изготавливавшимся ранее по ГОСТ 9206—59. Численные значения этих параметров представлены в работе [2].

Шлифпорошки из кубонита, подобно алмазным порошкам, выпускаются двух диапазонов: широкого и узкого. Обозначения зернистостей, перечень фракций и их процентное содержание для порошков из кубонита такие же, как и для алмазных порошков и микропорошков (см. табл. 6 и 8). Из кубонита изготавливают шлифпорошки двух марок (КО с размером зерен от 160/125 до 50/40 и КР с размером зерен от 250/200 до 50/40) и микропорошки КМ с размером зерен от 60/40 до 1/0 [12]. Выпускается также кубонит марки КН, обладающий повышенной абразивной способностью и содержащий повышенное количество монокристаллов. Абразивные и эксплуатационные свойства порошков из эльбора и кубонита зависят от формы зерен, шероховатости их поверхности и механической прочности. По шероховатости рельеф поверхности зерен из эльбора и кубонита [21] примерно равен рельефу естественных алмазных зерен, однако несколько уступает шероховатости синтетических алмазных зерен.

3. Доводочные и полировочные пасты и суспензии

Рассмотренные выше доводочные порошки составляют основу сложных по составу абразивно-доводочных и полирующих материалов (паст и суспензий).

Абразивная суспензия — это смесь, т. е. дисперсионная среда, в которой абразивные зерна распределены в жидкости в виде мельчайших частичек, находящихся во взвешенном состоянии. В качестве жидкостей для абразивных суспензий применяют дистиллированную воду, керосин и другие жидкие среды. Границы дисперсности таких суспензий определяются размерами абразивных частичек и лежат в пределах от десятых долей микрометра до десятых долей миллиметра, т. е. характеризуются, с

одной стороны, границей коллоидной области (0,1 мкм), а с другой — размерами частиц, быстро оседающих на дно в обычных условиях. Дисперсность абразивных суспензий определяется методом седиментационного анализа. Дисперсионные среды с размерами частичек менее 0,1 мкм относятся к золям, которые при абразивной обработке пока не применяются.

В суспензии соотношение жидкости (Ж) и абразивных или алмазных зерен (Т) может изменяться в довольно широких пределах: от 1:1 до 6:1 и более. Например, во ВНИИАлмаз при обработке изделий из корунда применялись суспензии Ж:Т=20:1 и 60:1. В первой суспензии жидкая фаза состояла из 4 весовых частей керосина и 16 подсолнечного масла, а во второй — из 50 частей керосина и 10 подсолнечного масла. Концентрация абразива в суспензии существенно влияет на производительность процесса. На выбор концентрации оказывает влияние ряд факторов. Обычно ее выражают в соотношениях весовых или объемных частей или в процентах. При использовании суспензий, как и для всех процессов абразивной обработки, главную роль в работе играет абразивное зерно. Рассматривать процессы обработки суспензиями целесообразно не с точки зрения общей массы или объема зерен, а исходя из количества в этой массе отдельных зерен. Поэтому, на наш взгляд, при исследовании абразивных суспензий концентрацию K целесообразнее выражать в шт/мм³ или в шт/м³ и т. д., т. е. как отношение числа абразивных зерен n к объему $v_{об}$ жидкости, в которую эти зерна будут внесены:

$$K = \frac{n}{v_{об}}.$$

Для характеристики процесса обработки такими суспензиями можно ввести коэффициент абразивного взаимодействия k_b , равный отношению числа зерен n_b , попавших на единичную площадку S обрабатываемой поверхности при скорости V истечения испытываемой суспензии в 1 мм/сек и концентрации абразива K , ко времени t , за которое это число перенесено:

$$k_b = \frac{n_b}{SVKt}.$$

Этот коэффициент характерен для каждой среды. Приняв в последней формуле $n_b=1$ шт., $S=1$ мм², $V=1$ мм/сек, $K=1$ шт/мм³, $t=1$ сек, получим $k_b=1$, т. е. коэффициент абразивного взаимодействия является величиной безразмерной.

С уменьшением количества жидкости в суспензии число абразивных зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, увеличивается, однако немонотонно. При постепенном уменьшении количества жидкости устанавливается равновесие между числом зерен, вступающих в контакт с обрабатываемой поверхностью и отводящихся от нее. В данном случае концентрацию абразивных зерен в суспензии можно считать оптимальной. Коэффициент k_b достигает значений, близких к максимуму. В общем же случае значения k_b изменяются в пределах $0 < k_b \leq 1$.

Конечно, такое равновесие — понятие условное. При рассмотрении его следует учитывать, что смена зерен происходит немедленно и они имеют не плоскостное, а объемное расположение, т. е. смена одних зерен другими «растянута» во времени и в пространстве. При дальнейшем уменьшении количества жидкости число зерен, участвующих в контакте с обрабатываемой поверхностью, уменьшается, т. е., несмотря на увеличение K , коэффициент k_v начинает постепенно снижаться. Режущая способность абразивных зерен в таких суспензиях используется не полностью. Поэтому суспензии с малым количеством жидкости показывают меньшую производительность.

Повышение количества жидкости в суспензии приводит к тому, что при чрезмерном количестве жидкости на единицу объема приходится очень мало абразивных частиц. Производительность обработки такими суспензиями мала. Иногда потеря производительности от неправильного подбора концентрации K не может быть восполнена ни уменьшением давления (т. е. скорости транспортировки суспензии), ни конструкцией применяемого устройства, ни какими-либо другими способами. Поэтому к выбору концентрации абразива в суспензии необходимо относиться с большим вниманием. Некоторые рекомендации по этому вопросу приведены в следующем параграфе данной главы.

Применение рода жидкости в суспензии способствует изменению производительности процесса доводки. Если принять производительность суспензии на основе воды за единицу, то коэффициенты относительной производительности для других жидкостей будут соответственно равными: для керосина — 0,7; спирта — 0,57; машинного масла — 0,3; глицерина — 0,03 [41].

Паста представляет собой тестообразную массу, по густоте близкую к застывшей, сметанообразной или жидкой мази, но отличающуюся от нее значительным содержанием абразивного микропорошка. Кроме абразивного микропорошка, в консистенцию пасты входят различные вспомогательные вещества; в состав вспомогательных веществ — жиры, масла, сложные кислоты, керосин, бензин и другие компоненты, которые в совокупности образуют жидкотекучую часть абразивно-доводочного материала.

Жидкотекучая, или неабразивная, часть пасты транспортирует в зону доводки абразивный материал и удаляет из нее шлам и другие отработанные продукты. Кроме того, неабразивная часть активно влияет и на сам процесс обработки. Иногда, особенно при полировании, это влияние может стать доминирующим. Роль, которая отводится неабразивной части пасты или суспензии, определяется составом вспомогательных веществ. Вещества, входящие в жидкотекучую часть, являются в ней жировой основой, связующим материалом, активной химической добавкой или растворителем. Жировая основа и связующий материал образуют связку пасты.

Вспомогательные вещества по назначению можно подразделить на три группы: связки, специальные добавки и разбавители. Такое подразделение несколько условно, потому что один и тот же продукт одновременно может выполнять две или несколько функций, т. е. служить и

связкой, и специальной химически активной добавкой (например, стеарин) или связкой, добавкой и растворителем (например, олеин, маловязкие масла и др.).

Среди вспомогательных веществ наиболее распространены стеариновая и олеиновая кислоты, парафин, церезин, костное, машинное, авиационное и вазелиновое масла, говяжий жир, скипидар, канифоль, керосин, бензин, растворы-интенсификаторы и другие добавки. Олеиновая и стеариновая кислоты, а также некоторые растворы-интенсификаторы выполняют роль химически активных добавок, ускоряя процесс обработки. Парафин и стеарин придают пасте твердость. Масла, жиры, частично скипидар и керосин способствуют облегчению резания-царапания и создают на обрабатываемой поверхности антикоррозийные пленки. Кроме того, скипидар используется для разжижения брикетированных паст, а керосин и бензин — в качестве растворителей или разбавителей. Аналогичное действие имеют дибутилфталат, этиленгликоль, глицерин, асидол, аэросил, изоамилацетат, сополимеры, полипропиленгликоль и некоторые маловязкие масла (касторовое, веретенное, костное и др.). Канифоль применяется для повышения клейкости пасты или смеси. Включение в состав вспомогательных веществ некоторых красителей и ароматических добавок придает пасте желаемый цвет и благоприятный запах. Для удаления пасты с детали в качестве растворителей, кроме бензина, применяют ацетон или спирты.

В качестве связок используются стеарин (или его заменитель — жирные синтетические кислоты), жиры, гудроновое сало, церезин, солидол жировой, технический вазелин, петролатум, пчелиный воск и другие вещества.

Ниже приведены основные показатели некоторых вспомогательных веществ, для характеристики которых могут использоваться следующие параметры.

1. Плотность или относительная плотность. Относительная плотность чаще всего обозначается d_4^{20} . Цифра 20 показывает, что относительная плотность определена при температуре 20 °C (293 °K), а цифра 4 обозначает, что для сравнения за единицу принята плотность воды при температуре 4 °C (277 °K). Условия определения относительной плотности регламентированы ГОСТ 3900—47.

2. Температура застывания, каплепадения, вспышки, размягчения, плавления, кипения.

3. Вязкость. Различают кинематическую, условную и другие виды вязкости. Метод определения кинематической вязкости установлен ГОСТ 33—66. В этом случае вязкость выражается в сантистоксах. Если невозможно определить кинематическую вязкость, находят условную с помощью вискозиметров ВУ, ВЗ-1, ВЗ-4 и др.

Условная вязкость нефтепродуктов находится как отношение времени истечения 200 мл испытываемой жидкости из вискозиметра ВУ при определенной температуре испытания ко времени истечения такого же объема дистиллированной воды при 20 °C (293 °K). Время истечения воды является постоянной (водным числом) прибора. Величина названного отношения выражается числом условных градусов.

Условная вязкость лакокрасочных материалов (смола, полуфабрикатов и т. д.) находится двумя методами: первый применяется для материалов, обладающих свободной текучестью, второй — для материалов густой консистенции. В первом случае за условную вязкость принимают время непрерывного истечения определенного объема испытываемого материала через калиброванное отверстие вискозиметра ВЗ-1 или ВЗ-4, во втором пользуются шариковым вискозиметром. Здесь за условную вязкость принимают время прохождения стального шарика между двумя метками вертикально установленной стеклянной трубки вискозиметра, наполненной испытываемым веществом. В обоих методах условную вязкость выражают в секундах.

4. Показатель преломления света n находится по соотношению $n = \sin \alpha / \sin \beta$ (α — угол падения светового луча; β — угол преломления луча). Для определения n используют рефрактометры конструкции ИРФ-23, РЛУ-1, РЛ и др., при этом следует учитывать температуру опыта и длину волны света. Названные приборы позволяют находить показатель преломления для волны длиной 589 нм, что соответствует линии D спектра натрия. Наиболее часто показатель преломления вычисляют при 20 °C (293 °K); в этом случае его обозначают n_D^{20} или n_{589}^{20} . Показатель преломления позволяет характеризовать и определять чистоту органических веществ, а в некоторых случаях и состав смесей, показатели преломления которых значительно различаются по величине. По численному значению n с помощью специальных таблиц или по графическим кривым находится концентрация вещества. Наиболее успешно он применяется для определения бинарных смесей, например жиров, спиртов, сахаров и других веществ.

5. Относительная молекулярная масса (молекулярный вес) вычисляется по относительным атомным массам (атомным весам) углеродной шкалы (по изотопу C¹²) в соответствии с данными Международной комиссии по атомным весам.

Поэлементный количественный анализ веществ, используемых для паст и суспензий, занимает длительное время и проводить его в производственных условиях трудно, а иногда и нецелесообразно. Поэтому на практике количественный анализ многих веществ характеризуют с помощью особых констант или чисел. Числа выражают обычно в условных единицах количественное содержание в испытуемом продукте тех или иных частей или химических соединений. К этим константам относятся йодное число, кислотное, число омыления, эфирное и др.

6. Йодное число характеризует степень ненасыщенности вещества. По нему судят о содержании кратных (двойных или тройных) связей в органических соединениях или в их смесях. Этим числом широко пользуются при анализе жиров, жирных кислот, восков, растительных и минеральных масел, бензинов и при определении содержания реагирующих с йодом примесей в некоторых ароматических углеводородах. Определение йодного числа (например, жиров) основано на способности ненасыщенных жирных кислот (олеиновой и др.) присоединять по месту двойной связи два атома йода. Чем больше в жирах радикалов ненасыщенных жирных кислот, тем выше их йодное число. Численно йодное число

выражается количеством граммов йода, присоединяемого в заданных условиях к 100 г испытываемого вещества. Метод и условия определения йодного числа регламентированы ГОСТ 5475—69.

7. Кислотное число характеризует содержание свободных кислот в жирах, смолах, маслах и других органических соединениях. По кислотному числу можно судить о некоторых параметрах качества и свойствах вещества. Так, качество и технические характеристики жиров в значительной мере определяются содержанием свободных кислот. Кислотное число пищевых жиров должно быть не выше 2,5. Большинство технических жиров и растительных масел имеют кислотное число от 2 до 25. Численно оно выражается количеством миллиграммов едкого калия (KOH), которое расходуется на нейтрализацию свободных кислот в контрольном количестве испытываемого вещества. Для топлив и растворителей (керосина, бензина и т. д.) в качестве контрольной меры принят объем 100 мл, а для масел и смазок (стеарина, олеина, церезина, вазелина, скипидара, петролатума и др.) — вес 1 г.

8. Число омыления определяет содержание в веществе компонентов, способных омыляться. Этот показатель является мерой содержания в исследуемом веществе кислот, как свободных, так и связанных в форме сложных эфиров. Число омыления — важная техническая характеристика жиров, так как оно характеризует молекулярный вес кислот, входящих в их состав в виде глицеридов. Численно этот показатель находится по количеству миллиграммов соляной кислоты, израсходованной на титрование определенного количества едкого калия и смеси его с испытываемым веществом. Условия определения числа омыления регламентированы ГОСТ 5478—64, 17362—71 и др.

Разница между величиной числа омыления и кислотным дает эфирное число, которое характеризует содержание триглицеридов в продукте. Триглицериды являются главной составной частью жиров. По нашему мнению, неабразивные компоненты паст можно разделить на три основные группы: 1) вещества, содержащие углеводороды; 2) кислоты, соли кислот и их соединения; 3) вещества, содержащие производные предельных и непредельных углеводородов.

1. Вещества, содержащие углеводороды. Сюда относятся парафины, церезин, масла, скипидар, бензол и другие вещества.

Парафин — смесь твердых высокомолекулярных углеводородов предельного характера. Состав парафина выражается формулами от C₁₉H₄₀ до C₃₅H₇₂. В промышленности наиболее широко используются парафины, изготавливаемые из нефти. В настоящее время нефтяные парафины выпускаются следующих марок (ГОСТ 16960—71): высокоочищенный парафин В₁ 50—52, В₂ 52—54, В₃ 54—56, В₄ 56—58; технически очищенный Т; используемый для синтеза жирных кислот С; неочищенный спичечный Н_с, неочищенный высокоплавкий Н_в.

Для изготовления паст применяются чаще всего высокоочищенные парафины. Они представляют собой белую кристаллическую массу с температурой плавления, величина которой в градусах Цельсия указана после букв В₁—В₄. Парафин является поверхностно нейтральным веществом, которое практически не растворяется и не смачивается водой,

поэтому в пастах в качестве единственного неабразивного компонента он не применяется. Наиболее часто его используют в смеси в соотношении 1 : 1 со стеариновой кислотой. Парафин обладает способностью образовывать на обрабатываемой поверхности эластичные пленки, которые предохраняют поверхность от попадания на нее воды, паров и газов.

Церезин — продукт переработки горного воска (озокерита), в природе образуется из нефти и состоит главным образом из твердых предельных углеводородов. Озокерит почти не окисляется и имеет высокую температуру плавления. Согласно ГОСТ 2488—73, выпускаются четыре марки церезина: 80, 75, 67 и 57. Марка церезина соответствует температуре каплепадения в °С; кислотное число его 0,1—0,15. Кроме связующих свойств, введение в пасту церезина улучшает ее пластические показатели, в частности пластические свойства парафина, способствуя гомогенизации восков.

Церезиновая композиция — сплав церезина с парафином. Церезиновая композиция состоит из $45 \pm 5\%$ церезина марок 57 и 67 и $55 \pm 5\%$ парафина; температура каплепадения 56 °С (329 °К). Применяется она в тех же случаях, что парафин и церезин.

Петролатум — смесь церезина и парафина с очищенным высоковязким мылом. Температура каплепадения его не менее 55 °С (328 °К); кислотное число 0,1; температура вспышки 230—250 °С (503—523 °К). Качество петролатума регламентировано ГОСТ 4096—49. Выпускаются три марки петролатума: ПК — сернокислотный, ПС — селективный, ПС_с — селективный сернистый. В пастах наиболее часто используется петролатум марки ПК.

Вазелин технический (смазка универсальная низкоплавкая УН) — смесь, которую готовят путем сплавления в различных пропорциях следующих веществ: петролатума, парафина, церезина, индустриального и II цилиндрического масел, кубовых отходов приборных масел, а также тяжелых парафиновых и озокеритовых дистиллятов. Технические требования на вазелин определены ГОСТ 782—59. Его температура каплепадения должна быть не ниже 54 °С (327 °К); кислотное число — 0,28; кинематическая вязкость при 70 °С (343 °К) — 20 сст ($2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$). В некоторых случаях в пастах вазелин может успешно заменять жиры.

Скипидар (масло терпентинное) — продукт переработки сосновой живицы. Это прозрачная, летучая жидкость с характерным запахом, состоящая из терпеновых углеводородов $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$. Скипидар легко окисляется на воздухе, особенно на свету; растворяет жиры, смолы, каучук; под действием тепла и кислот легко изомеризуется и полимеризуется. В доводочных и полировальных пастах и суспензиях используется скипидар марки А (ГОСТ 1571—66). Его плотность при 20 °С (293 °К) 0,855—0,863 г/см³ (855—863 кг/м³); n_D^{20} 1,467—1,472; кислотное число 0,7; температура начала кипения 153—160 °С (426—433 °К).

Бензол — бесцветная подвижная жидкость, содержащая ароматические углеводороды C_6H_6 . Его относительная плотность d_4^{20} 0,879; n_D^{20} 1,5017; температура кипения 80,1 °С (353,1 °К); относительная молекулярная масса 78,11. Бензол имеет своеобразный запах, не растворяется

в воде. Получают его из коксового газа, содержащего смесь ароматических углеводородов: бензола, толуола, ксилола и др. Применяется бензол в качестве растворителя органических составляющих паст.

Керосин осветительный (ГОСТ 4753—68) получают при прямой перегонке нефти; содержит углеводороды от $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ до $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$. Основные его показатели: относительная плотность d_4^{20} 0,84; кислотное число 1,4; температура вспышки 40 °С (313 °К).

Бензин марки Б-70. Качество бензина регламентировано ГОСТ 1012—72. Эта марка бензина имеет кислотное число 1, йодное число 2. Кроме того, стандарт предусматривает еще три марки: Б-100/130, Б-95/130, Б-91/115. Бензины содержат углеводороды от C_7H_{16} до C_9H_{20} . Бензин, так же как и керосин, используется для растворения пасты и смывания ее с деталей после обработки.

Четыреххлористый углерод (CCl_4) — неполярная прозрачная жидкость. Относительная молекулярная масса его 153,82; d_4^{20} 1,595; n_D^{15} 1,4631; температура плавления —23 °С (250 °К); пары совершенно негорючи. Получается CCl_4 из предельных углеводородов в результате реакции замещения; применяется как растворитель жиров, смол и других веществ; способствует образованию на поверхности металлов мягких пленок сульфидов, хлоридов, поэтому используется также как противозадирная присадка; в воде практически не растворяется.

Обычно все существующие в природе вещества разделяют на гидрофильные, смачиваемые водой, и гидрофобные, которые вода не смачивает. Все углеводороды относятся к гидрофобным веществам. Они составляют основу водонерастворимых паст.

2. Кислоты, соли кислот и некоторые их соединения. Сюда относятся стеарин, олеин и другие вещества.

Стеарин представляет собой смесь стеариновой и пальмитиновой кислот, которые относятся к разряду одноосновных предельных карбоновых кислот. В молекулах карбоновых кислот содержится группа атомов COOH , которая называется карбоксилем. Стеариновая кислота, входящая в стеарин, имеет формулу $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$. Температура плавления ее 69,6 °С (342,6 °К), температура кипения 376,1 °С (649,1 °К); d_4^{20} 0,849; n_D^{80} 1,4296; относительная молекулярная масса 284,49. Стеариновая кислота (стеарин) дистиллированная получается при прессовании охлажденного гидролизата животных жиров. Из выпускаемых промышленностью четырех сортов (двух особых, первого и второго) для изготовления паст чаще всего используют стеарин первого и второго сорта как наиболее дешевые. Эти сорта имеют следующие показатели: йодное число соответственно 18 и 32, кислотное 198—210, число омыления 200—213; температура застывания соответственно 58 °С (331 °К) и 53 °С (326 °К). Стеарин обладает высокими поверхностно-активными свойствами: хорошо смачивает твердые тела; в воде не растворяется, хорошо растворяется в горячем этиловом спирте и эфире. Применение стеарина, несмотря на его достоинства, удорожает пасту. В качестве заменителя стеарина в последнее время используют петролатум, жирные синтетические кислоты и другие более дешевые материалы.

Олеин (техническая олеиновая кислота) — смесь дистиллированных или недистиллированных преимущественно жидких жирных кислот, получаемых при расщеплении жиров и масел. Основная составляющая часть олеина — олеиновая кислота $C_{17}H_{33}COOH$, представляющая собой непредельную одноосновную карбоновую кислоту. Это бесцветная маслянистая жидкость, легче воды, на холоде затвердевает в игельчатые кристаллы, плавится при $14^{\circ}C$ ($287^{\circ}K$); относительная молекулярная масса 282,47; на воздухе легко окисляется, в результате чего желтеет; присоединяя два атома водорода, способна переходить в стеариновую (предельную кислоту); хорошо растворяется в этиловом спирте, эфире, бензоле, не растворяется в воде.

Промышленностью олеин вырабатывается трех марок: А, Б, В. Для изготовления паст используются обычно марки А и Б. Основные его показатели: плотность d_4^{20} 0,8906; n_D^{20} 1,45823; кислотное число 185—200, йодное 80—105. Олеин разжижает пасту, делает ее более вязкой; обладает высокой химической активностью и ускоряет растворение окислов металлов. Наиболее эффективно применение олеина в пастах при обработке металлов, имеющих прочную пленку окислов, например алюминия.

Кислоты синтетические жирные фракций (C_{17} — C_{21}) — продукт твердой консистенции от кремового до светло-желтого цвета. В промышленности выпускаются две марки синтетических кислот: СЖКС-Т — для производства тугоплавких смазок и СЖКС-С — для производства среднетемплавных. При изготовлении доводочных и полировальных паст применяют обе марки. Эти марки чаще всего используются в качестве заменителей стеарина. Их кислотное число 180—240, йодное 12—15. Эти кислоты обычно получают из твердого парафина. Наиболее эффективно применение их в пастах, предназначенных для обработки углеродистой и нержавеющей сталей, латуни, а также различных гальванических покрытий. Кроме обычных, иногда используются и термообработанные жирные кислоты фракций C_{20} и выше, C_7 — C_9 и C_5 — C_7 , которые имеют эфирное число соответственно 40, 3, 1, а кислотное — соответственно не менее 100, 370—410, 420—500.

Нефтяные сульфокислоты (контакт Петрова) — один из катализаторов, ускоряющих процесс расщепления (омыления) присутствующих в пастах жиров. Это густая прозрачная жидкость от темно-желтого до бурого цвета с синеватым отливом, которая содержит 50—55% нефтяных сульфокислот, около 15% вазелинового масла и немного свободной серной кислоты. В воде практически не растворяется. Промышленностью выпускаются три марки контакта Петрова: два керосиновых (КП_к-1 и КП_к-2) и газойлевый (КП_г). Контакт Петрова иногда вводится в состав паст для интенсификации процесса доводки или полирования.

Нефтяные кислоты — продукт щелочной очистки керосиновых, газойлевых, масляных и соляровых дистиллятов. Представляет собой смесь свободных (не растворимых в воде) органических кислот и их натриевых солей и мыл. Выпускаемые промышленностью нефтяные кислоты разделяют на четыре группы: дистиллированные нефтяные кис-

лоты, асидол-мылонафт, асидол, мылонафт. В зависимости от группы содержание кислот изменяется от 43 до 95%, а кислотное число — от 175 до 260.

Молочная или оксипропионовая кислота (CH_3 — $CHON$ — $COOH$) относится к разряду спиртокислот, содержащих в молекуле и спиртовой гидроксил и карбоксильную группу $COOH$. Основные ее показатели: относительная молекулярная масса 90,08; d_4^{15} 1,249; температура плавления $18^{\circ}C$ ($291^{\circ}K$); n_D^{20} 1,4414; хорошо растворяется в воде и этиловом спирте. В состав доводочных материалов молочная кислота начала вводиться только в последнее время. Впервые в состав паст она введена П. Д. Дудко с сотр. [35].

Канифоль сосновая — это хрупкая стекловидная масса, состоящая в основном из абетиновой кислоты, имеющей формулу $C_{19}H_{29}COOH$. Плотность ее 1,07—1,08 г/см³ (1070—1080 кг/м³); относительная молекулярная масса 302,46; температура размягчения 52—70 $^{\circ}C$ (325—343 $^{\circ}K$), кипения 248—250 $^{\circ}C$ (521—523 $^{\circ}K$); кислотное число 168—174; в воде не растворяется, хорошо растворяется в метиловом спирте, ацетоне; в состав паст вводится для интенсификации процесса, особенно при обработке оптических поверхностей.

Жир животный технический — один из основных компонентов паст. К жирам животным техническим относятся: говяжий, бараний, свиной, конский, утилизационный и смешанный. Жиры представляют собой сложные эфиры трехатомного спирта — глицерина и различных кислот, главным образом стеариновой, пальмитиновой, олеиновой, лауриновой, арахидиновой, линолевой и линоленовой. Требования, которым должен соответствовать жир животный технический, определены ГОСТ 1045—73. В зависимости от качества жир бывает I, II и III сорта. Для приготовления паст могут применяться все три сорта, но предпочтение отдают более дешевым. Свежие жиры почти не содержат свободных кислот. При длительном хранении и действии влаги, воздуха, света и тепла кислотное число жиров увеличивается. Жиры, имеющие кислотное число более 8, считаются прогоркшими. Прогоркание вызвано некоторым расщеплением жиров под действием содержащегося в них активного фермента — липазы, приводящего к появлению свободных кислот. К числу других факторов вызывающих прогоркание, относится окисление жирных кислот, особенно непредельных, под действием кислорода воздуха, а также образование перекисных соединений, оксикислот, альдегидов в результате деятельности микроорганизмов. Поэтому пасты, изготовленные на основе животных жиров, имеют ограниченный срок хранения.

Гудронное сало является отходом стеаринового производства и используется в качестве связки взамен животных технических жиров. По сравнению с этими жирами изготовление паст на гудронном сале менее трудоемко, кроме того, они выделяют меньше летучих веществ.

Сало животных содержит глицериды стеариновой, пальмитиновой и миристиновой кислот (тристеарин, трипальмитин и триолеин) в различных пропорциях. Чем больше в сале тристеарина и трипальмитина, тем оно тверже (говяжье и баранье); мягкое сало (гусиное и свиное) содер-

жит больше триолеина. Свиное сало имеет температуру плавления 20—25 °С (293—298 °К), говяжье — 43—49 °С (316—322 °К), баранье — 44—45 °С (317—318 °К); йодное число — соответственно 67—82, 32—47 и 31—46, число омыления — соответственно 191—196, 193—200 и 193—196.

Солидол жировой (смазка универсальная среднетемпературная УС) представляет собой соединение кальциевых солей высших жирных кислот с жидкими углеводородами (не выше $C_{16}H_{34}$). Выпускаются три марки универсальной среднетемпературной смазки УС: УС-1 (пресс-солидол), УС-2 (солидол Л) и УС-3 (солидол Т). Последний используется в пастах для замены жира животного и технического. Температура каплепадения его 90 °С (363 °К); кинематическая вязкость при 50 °С (323 °К) 27—52 сст ($(2,7—5,2) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$).

Пчелиный воск состоит из 70—74% сложных эфиров одноатомных спиртов и жирных кислот, 14—15% свободных жирных кислот и 12—15% предельных углеводородов. Иногда пчелиный воск отбеливают на солнце или с помощью различных окислителей (перекиси водорода, двуххромовокислого калия и др.). Он имеет высокую стойкость; температура плавления его 62—67 °С (335—340 °К); плотность 0,96—0,97 г/см³ (960—970 кг/м³); кислотное число 18—22, йодное 7—11, число омыления 87—107. Пчелиный воск вводится в пасты для лучшего связывания жиров и абразивов. В настоящее время он применяется редко, его заменяют более дешевым и менее дефицитным церезином или церезиновой композицией.

Кроме пчелиного, существует ряд других восков животного, растительного и ископаемого происхождения. Некоторые из них (озокерит, церезин) были рассмотрены выше. Экстракцией растворителями из бурых каменных углей добывают *воск-монтан*, состоящий из эфиров кислот и спиртов. Аналогичные воски получены при экстракции торфа. Монтанный воск имеет следующие свойства: температуру плавления 73—80 °С (346—353 °К); кислотное число 20—40, йодное 9—12, число омыления 60—100. Введение его в состав полирующих паст обеспечивает повышенный полирующий эффект.

Масло костное — жидкость бледно-желтого цвета. Как и другие масла, оно представляет собой сложные эфиры различных карбоновых кислот: стеариновой, пальмитиновой, олеиновой, линолевой и др. Получают его путем прессования закристаллизованного костного жира, вываренного из свиных цевочных и путовых костей крупного рогатого скота. Масло выпускается двух сортов: высшего и первого. Обычно в пастах используется масло высшего сорта. Основные его показатели: температура застывания — 18 °С (255 °К), температура вспышки 300 °С (573 °К); условная вязкость при 20 °С (293 °К) 11—13 условных градусов; кислотное число 0,2, йодное не менее 75.

Масло касторовое — прозрачная жидкость. Техническое касторовое масло вырабатывается прессованием или экстракцией из семян клещевины. Основные его показатели: плотность при 20 °С (293 °К) 0,947—0,970 г/см³ (947—970 кг/м³); температура застывания — 16 °С (257 °К); кислотное число 1,6—5, йодное 82—91.

Масло вазелиновое. Основные физические константы его следующие: кислотное число 0,04; температура вспышки 125 °С (398 °К), застывания — 20 °С (253 °К); условная вязкость 1,4—1,72.

Масла промышленные. В зависимости от средней кинематической вязкости устанавливаются пять марок этих масел: промышленное 12 (веретенное 2), промышленное 20 (веретенное 3), промышленное 30 (машинное Л), промышленное 45 (машинное С), промышленное 50 (СУ). Цифры 12, 20, 30, 45 и 50 соответствуют средней кинематической вязкости, сст. Кислотное число этих масел изменяется в пределах 0,14—0,35, температура вспышки — от 165 до 200 °С (от 438 до 473 °К).

Масло веретенное АУ. Его показатели: температура застывания не выше — 45 °С (228 °К), температура вспышки не ниже 163 °С (436 °К); кислотное число 0,07; кинематическая вязкость при 20 °С (293 °К) не более 49 сст ($4,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$).

Талловое масло — связующая жидкая среда для паст. Содержание: кислоты 96—94% (из них жирные карбоновые от 57 до 66, смоляные 30—37), нейтральные вещества около 5, влага 0,3%. Талловое масло имеет слабую поверхностную активность. Активность масла повышается с введением в него 5%-ного раствора альбихтола в скипидаре. Оптимальное количество добавки 20 вес. % масла.

Кроме рассмотренных, при изготовлении паст (особенно опытных) применяются и другие масла: цилиндрическое, авиационное и т. д. Большинство веществ, приведенных в этой группе, являются поверхностно-активными (ПАВ). Поверхностное натяжение этих веществ меньше поверхностного натяжения растворителя, они обладают и сравнительно малой растворимостью. В противном случае при хорошей растворимости ПАВ стремились бы уйти вовнутрь растворителя. Поверхностно-активные вещества состоят из двух частей: полярной группы и неполярного углеводородного радикала. Гидрофобный углеводородный радикал — причина растворимости этих соединений. Такие вещества адсорбируются на поверхности раствора (детали), ориентируясь углеводородными радикалами наружу. Благодаря этому на поверхности раствора (детали) образуется как бы пленка углеводорода. Этим и объясняется понижение поверхностного натяжения и повышение смачивающей способности при введении ПАВ. Известно влияние ПАВ на агрегативную устойчивость эмульсий, куда они вводятся в качестве эмульгаторов.

ПАВ и их соли обладают моющим действием. Это свойство наиболее выражено у солей тех жирных кислот, у которых число атомов углерода в цепи не меньше 5—10 и не больше 22. Соли жирных кислот, углеводородная цепь которых содержит больше 22 атомов углерода, практически нерастворимы в воде. Моющим действием обладают соли нафтиновых кислот, которые содержатся в мылонафте, и соли сульфокислот. Соли сульфокислот (и сами сульфокислоты) в отличие от солей других кислот достаточно хорошо растворимы в воде. У солей как карбоновых кислот, так и сульфокислот носителем поверхностно-активных свойств является анион. При адсорбции таких веществ на поверхности она приобретает отрицательный заряд. Поэтому такие вещества называются анионноактивными (иногда ионогенными).

3. Вещества, содержащие многоатомные производные предельных и непредельных углеводов. Сюда относятся спирты, фенолы, амины и др.

Этиленгликоль ($\text{CH}_2\text{OH}—\text{CH}_2\text{OH}$ или $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) — густая бесцветная жидкость, не имеет запаха, обладает сладким вкусом. Этиленгликоль получают из окиси этилена при нагревании ее с водой. Основные его показатели: относительная молекулярная масса 62,07; температура плавления $-13,2^\circ\text{C}$ ($259,8^\circ\text{K}$); d_4^{20} 1,114; n_d^{20} 1,4319; хорошо растворяется в воде, этиловом и метиловом спиртах, ацетоне.

Пропиленгликоль ($\text{CH}_2\text{OH}—\text{CH}_2—\text{CH}_2\text{OH}$ или $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) — густая бесцветная жидкость, сладкая на вкус, без запаха. В соединении с кислотой пропиленгликоль образует молочную кислоту. Основные константы пропиленгликоля: относительная молекулярная масса 76,10; температура кипения 188°C (461°K); d_4^{20} 1,040; n_d^{20} 1,4396; хорошо растворяется в воде и этиловом спирте.

Пропиленгликоль и этиленгликоль — типичные представители двухатомных спиртов — гликолей. Они могут быть получены заменой в предельных углеводородах двух атомов водорода на гидроксильные группы, например, путем окисления их раствором марганцевокислого калия. Этиленгликоль, пропиленгликоль, а также окись этилена ($\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}$), которая имеет относительную молекулярную массу 44,05, и продукты ее соединения с ароматическими спиртами, например бензоловым, обладают высокой химической поверхностной активностью. Эти вещества в отличие от стеариновой, олеиновой и других карбоновых кислот образуют группу неионогенных поверхностно-активных веществ. Сюда можно отнести также блоксополимеры окисей этилена и пропилена. Наиболее часто эти вещества применяются в водорастворимых пастах.

Вещества вспомогательные ОП-7, ОП-10 представляют собой продукты обработки моно- и диалкилдиолов окисью этилена. Они имеют вид маслообразных жидкостей или мазей. Эти вещества обладают высокой поверхностной активностью, интенсифицируют процесс обработки и облегчают удаление следов паст с обработанных поверхностей при последующем обезжиривании.

Глицерин ($\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ или $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$) — густая прозрачная жидкость сладкого вкуса. Глицерин — основной представитель трехатомных спиртов, которые содержат три гидроксильные группы. Основные его константы: относительная молекулярная масса 92,10; температура плавления $17,9^\circ\text{C}$ ($290,9^\circ\text{K}$); d_4^{20} 1,260; температура кипения 290°C (563°K); с водой и другими растворителями смешивается в любых соотношениях; вводится в состав водорастворимых паст.

Триэтаноламин $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$ — маслянистая жидкость темного цвета. Физические константы: относительная молекулярная масса 149,19; температура плавления $21,2^\circ\text{C}$ ($294,2^\circ\text{K}$), кипения $277—279^\circ\text{C}$ ($550—552^\circ\text{K}$); d_4^{20} 1,124; n_d^{20} 1,4852; хорошо растворяется в воде и других растворителях.

Препарат ОС-20 представляет собой воскообразную твердую смесь полиэтиленгликолевых эфиров высших жирных спиртов. Препарат

выпускается трех марок: А, Б и В. Их получают на основе различных исходных продуктов (ГОСТ 10730—64). В зависимости от марки цвет препарата изменяется от белого до светло-коричневого, а йодное число — от 0,5 до 2 и выше. В производстве опытных лабораторных паст используются все три марки препарата. Положительным свойством препарата является то, что он предотвращает накопление статического электричества на полируемой поверхности (что важно при полировании больших поверхностей, особенно с лакокрасочным покрытием) и способствует повышению стойкости растворителя и восковых компонентов.

Сахароза $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ — мелкокристаллический порошок, хорошо растворимый в воде; молекулярный вес 342,3; малоактивен в отношении воды. Сахара обычно не изменяют поверхностного натяжения воды, однако они поверхностно-активны на границе водный раствор — твердое тело. В производстве паст применяется очень редко, иногда используется для изготовления суспензий и специальных СОЖ. Примесь сахарозы к воде уменьшает ее электропроводность. С некоторыми веществами (железом, алюмосиликатами) сахароза образует растворимые в воде сахараты, твердость которых меньше твердости основного металла. Это способствует удалению металла с обрабатываемой поверхности и обнаживанию режущих зерен абразивно-алмазных брусков, лент и т. д.

Мочевина — диамид угольной кислоты — кристаллическое соединение с температурой плавления 133°C (406°K); d_4^{20} 1,335; n_d^{25} 1,484; молекулярный вес 60,06; растворима в воде, спиртах, жидком аммиаке; иногда применяется в составе водорастворимых паст; способствует химическому воздействию пасты на металлическую поверхность во время доводки и предохраняет поверхность от окисления и потускнения.

Пасты и суспензии в зависимости от твердости абразива разделяются на две большие группы. Пасты и суспензии, изготовленные на основе абразивных материалов, твердость которых больше твердости материала обрабатываемой детали, носят условное название «твердые» и применяются главным образом при абразивной доводке. Если же они составлены на основе абразивных порошков, твердость которых ниже или равна твердости материала детали, то их относят к разряду «мягких» и применяют чаще всего при полировальных работах. К твердым пастам можно отнести абразивные (изготовленные на основе электрокорундов, карбида кремния, карбида бора и др.), алмазные и эльборовые. Составы таких паст весьма разнообразны.

Твердые пасты широко применяются как в общем, так и в отраслевом машиностроении, приборостроении и оптико-механической промышленности. Рассмотрим применение твердых паст на примере доводки высокоточных деталей: пасты для обработки отверстий — на примере деталей топливной аппаратуры и гидроаппаратуры; пасты для обработки сферических поверхностей — на примере доводки шариков и колец подшипников; пасты для обработки плоских поверхностей — на примере концевых мер длины, мерительных инструментов и других деталей.

В табл. 11 приведены составы твердых паст, применяемых на ряде заводов, выпускающих топливную аппаратуру двигателей: на Ярославском заводе топливной аппаратуры (ЯЗТА), Ногинском заводе топлив-

Таблица 11

Характеристика абразивных паст, применяемых для доводки деталей топливной аппаратуры

Компоненты пасты	Содержание компонентов, вес. %																			
	ЯЗТА										НЗТА			ХТЗ					ЛКЗ	
	M40	M40	M40	M28	M28	M10	M7	M5	M3	M28/20	M14/10	M7/5	M3/3	M3/2	M1/0	M28	M20	M10	M3	M28
Электрокорунд пор- мальный Э	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Электрокорунд белый	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЭБ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Окись хрома ОХ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Окись алюминия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Карбид кремния КЗ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Алмаз синтетический	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АС	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Олеиновая кислота	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Стеарин	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Парафин	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Керосин осветительный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Говяжий жир	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Масло костное	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Масло вазелиновое	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Жир расщепленный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
свиной	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Дополнительно вводится 20% корундовых зерен № 3.

ной аппаратуры (НЗТА), Харьковском тракторном заводе (ХТЗ) и Ленинградском карбюраторном заводе (ЛКЗ). Обработываемые детали на этих заводах изготавливаются из следующих сталей: на ЛКЗ из хромо-молибденовой стали 25Х5МА твердостью после азотирования *HRC* 62—67, на ХТЗ и НЗТА из сталей ХВГ твердостью после закалки *HRC* 60—65 и на ЯЗТА из сталей Р18 (*HRC* 60—65), ШХ15 (*HRC* 58—65), 18Х2Н4ВА твердостью после цементации *HRC* 56—60, а также из сталей 20Л или 20Х с цементированным слоем на глубину 0,2—0,7 мм (*HRC* 56), стали 45 (*HRC* 18—24 и *HRC* 54—58), стали 40Х (*HRC* 24—30). Для окончательной доводки деталей топливной аппаратуры отраслевой Центральный научно-исследовательский институт топливной аппаратуры (ЦНИТА) рекомендует пасты ЭМ1 и АСМ 3/2. Составы паст приведены в табл. 12. Отличие этих паст от названных выше (см. табл. 11) в том, что из них исключен керосин, а содержание олеиновой кислоты уменьшено до 5%.

На ряде подшипниковых заводов нашей страны, в частности на Минском подшипниковом заводе (ГПЗ-11), для массовой доводки шариков из стали ШХ15 II и I степеней точности применяют доводочные пасты двух составов. На операции первой доводки для получения шариков II степени точности паста содержит следующие компоненты: масло машинное — 56%; арахин — 11,5; парафин — 17; микропорошок М14 — 13,5; окись хрома — 2%. Для второй (окончательной) доводки шариков II степени точности применяется паста следующего состава: масло машинное — 83; арахин — 8,5; окись хрома ОХЧ-1 — 8,5%. Эти пасты обеспечивают получение требуемых геометрических параметров (овальности, гранности, разноразмерности) и шероховатости поверхности. Имеются

Таблица 12

Составы некоторых паст ЦНИТА

Индекс и цвет пасты	Характеристика компонентов	Содержание, вес. %
ЭМ1, светло-зеленая	Микропорошок белого электрокорунда марки Э9АМШ	20
	Кислота стеариновая техническая (стеарин)	30
	Парафин нефтяной марок А, Б, Г, Д	10
	Олеиновая кислота техническая марок А и Б	5
	Авиационное масло	35
АСМ 3/2, розовая	Алмаз синтетический АСМ 3/2	2
	Кислота стеариновая техническая (стеарин)	20
	Парафин нефтяной марок А, Б, Г, Д	20
	Олеиновая кислота техническая марок А и Б	3
	Масло костное	10
	Масло авиационное	45

Примечание. Метод окраски—спиртовой раствор роданида.

Таблица 13

Пасты и оборудование для доводки приборных шариков (по данным ВНИИПП)

Степень прочности	Оборудование для доводки шариков	Состав паст	Содержание, %
1	Безэлеваторные станки: 1) конструкции ВНИИПП, мод. ДПШ-8; 2) конструкции 4ГПЗ, мод. 57	Окись хрома ЧДА Парафин Веретенное масло 2 или АУ (выпаренное) Монокорунд МЗ Парафин Веретенное масло 2 или АУ (выпаренное) Пыль окиси алюминия модификации γ Веретенное масло 2 Олеиновая кислота Окись алюминия Веретенное масло 2 Олеиновая кислота Присадка микропорошка МГН	12,0 0,5 87,5 3,0 0,5 96,5 12,0 87,0 1 4,0 96,0 10 см ³ на 1 л пасты 2—3 чайные ложки на 100—150 г пасты
0	Безэлеваторные станки: 1) конструкции ВНИИПП, мод. ЛП-8861; 2) конструкции 4ГПЗ, мод. 23	Окись хрома ЧДА Парафин Веретенное масло 2 или АУ (выпаренное) Монокорунд М-1 Парафин Веретенное масло 2 или АУ Пыль окиси алюминия модификации γ Веретенное масло 2 Олеиновая кислота	5,0 0,5 94,5 5,0 0,5 94,5 12,0 88,0 10 г на 1 л
01	Безэлеваторный станок конструкции ВНИИПП, мод. ЛП-8861	Глинозем непрокаленный М0,7 Парафин Веретенное масло 2 или АУ	2 1,0 97,0
02		Окись хрома ЧДА Парафин Веретенное масло 2 или АУ	5,0 0,5 94,5

сведения о возможности использования пасты второго состава и для получения шариков I степени точности.

Приборные шарик 1, 0, 01, 02 степеней точности изготавливаются из стали ШХ15, сталей вакуумного и электрошлакового переплавов (ШХ15ВД, ШХ15Ш). Допускаемые отклонения по овальности и гранности шариков I степени точности 0,5 мкм, 0 степени — 0,25—0,4, 01 степени — 0,15—0,2, 02 степени — 0,1—0,15, разноразмерность — соот-

ветственно 1; 0,5—0,8; 0,3—0,4 и 0,2—0,3 мкм, а класс шероховатости — соответственно 12, 13, 13 и 13-й. Эксперименты по выбору паст для доводки шариков этих степеней точности проведены во ВНИИПП. Получены предварительные данные по составу доводочных паст. Результаты этих экспериментов по выбору доводочных паст представлены в табл. 13.

Недостатки приведенных паст — нестабильность качества доводки и низкий процент выхода годных шариков. Поэтому поиски составов паст для доводки высокоточных шариков необходимо продолжить. Для доводки деталей, изготовленных из легированных и инструментальных сталей (ХВГ, 2Х13, 25Х5МА, 38ХМЮА, 12Х2Н4А, Р18 и др.) в Харьковском институте радиоэлектроники (ХИРЭ) при участии Московского насосного завода им. М. И. Калинина, предложен ряд паст на основе электрокорунда хромистого [42, 43]. Составы этих паст приведены в табл. 14. Допустимый процент колебания спецраствора в крупнозернистых пастах от 1 до 2, в мелкозернистых пастах 0,5—1. Спецраствор (интенсификатор) включает 12% канифоли, 46 этилового спирта, 32 неочищенного скипидара, 10% осветительного керосина. Для достижения 100% в приготовленную пасту вводится разбавитель из касторового масла и дибутилфталата (1:1).

При введении в смазочно-охлаждающую жидкость некоторого количества мелкодисперсного порошка сплава Вуда (Bi — 50%; Pb — 25; Sn — 12,5; Cd — 12,5%) значительно повышаются производительность обработки и стойкость инструмента при сверлении труднообрабатываемых сплавов. В основе этого лежит эффект адсорбционного понижения прочности твердых тел под действием металлических расплавов [44].

Таблица 14

Состав абразивных паст для обработки стальных деталей повышенной твердости

Назначение	Условное обозначение пасты	Твердые составляющие		Химически активные добавки связи, %				Цвет окрашивания
		тип абразива	кол-во, %	олеи	стеарин	парафин	спецраствор	
Для черновых работ	ДМ40-С	ЭХМ40	30	25	30	5	5	Серый
	ДМ28-С	ЭХМ28	30	25	30	5	5	
	ДМ20-С	ЭХМ20	25	25	30	5	5	
Для чистовых работ	ДМ14-С	ЭХМ14	23	25	30	5	4	»
	ДМ10-С	ЭХМ10	22	25	30	10	4	
	ДМ7-С	ЭХМ7	21	25	32	10	3	
Для тонких работ	ДМ5-С	ЭХМ5	20	25	33	12	3	Вишневый
	ДМ3-С	ЭХМ3	18	23	35	13	3	
	ДМ2-С	ЭХМ2	15	22	36	15	2	
Для окончательных сверхтонких работ	ДМ1-С	ЭХМ1	12	21	37	16	2	Желтый
	ДМ0,5С	ЭХМ0,5	10	20	38	16	1	

Успешная попытка использовать это явление была сделана и применительно к доводке и полированию [45]. Порошок Вуда позволил интенсифицировать процесс доводки алмазными пастами. Наилучшие результаты достигнуты при содержании порошка в пасте от 1 до 4%.

В зависимости от зернистости абразивных, алмазных или эльборовых зерен пасты и суспензии делятся на грубые, средние и тонкие. Такое деление особенно четко прослеживается на примере паст Челябинского завода мерительных инструментов (ЧЗМИ), применяемых для доводки деталей и мерительных инструментов из стали ШХ15 (табл. 15).

Таблица 15
Составы паст Челябинского завода мерительных инструментов

Вид пасты	Компоненты	Содержание, %	Материал притира	Достижимый класс шероховатости
Грубая	Карбид бора № 3	36,0	Чугун	7—8-й
	Окись хрома	15,0		
	Парафин	18,3		
	Стеарин	21,2		
	Воск натуральный	3,2		
	Керосин	6,3		
Средняя	ЭБМ10	48,0	»	8—9-й
	Стеарин	50,0		
	Канифоль	2,0		
Средняя	ЭБМ7	60,0	»	9—10-й
	Стеарин	40,0		
Тонкая	ЭБМ5	65,0	Чугун, сталь Ст. 2	10а—10в
	Олеиновая кислота	10,0		
	Стеарин	10,0		
	Рыбий жир	20,0		
	Керосин	5,0		
Тонкая	ЭБМ3	50,0	Чугун, сталь Ст. 3	10—11-й
	Олеиновая кислота	10,0		
	Стеарин	40,0		

С 1972 г. введен стандарт и на пасты, изготавливаемые из природных и синтетических алмазов (ГОСТ 16877—71). Однако этот стандарт регламентирует только абразивную часть пасты, состав же связующих неабразивных веществ не ограничивается. Концентрация алмазов в пасте может быть нормальной (Н) или повышенной (П). Концентрация, а также цвет пасты и ее этикетки приведены в табл. 16.

В зависимости от свойств жидкотекучей части абразивно-доводочные материалы делятся на три группы: смываемые водой; смываемые органическими растворителями; смываемые водой и органическими растворителями. Для алмазных паст введены следующие обозначения: В — смываемая водой; О — смываемая органическими растворителями; ВО — смываемая водой и органическими растворителями.

Известны новые алмазные пасты, разработанные во ВНИИАлмаз и предназначенные для доводки и полирования неметаллических мате-

риалов. В состав паст в качестве абразива входят только специальные алмазные порошки узкой классификации и поверхностно-активные вещества. Они могут использоваться в радиоэлектронике, оптике и других отраслях промышленности, где необходима обработка таких неметаллических материалов, как рубин, керамика, кварц и др. Для обработки кремния, германия и других материалов в УкрНИИСМИ предложена паста, содержащая: алмазный порошок — 1—10 вес.%; воск — 10—15; аэросил — 10—15; изоамилацетат — 0,1—1 вес.%; эмульгатор ОП-7 — остальное [46]. Равномерное распределение абразивных частиц и пре-

Таблица 16
Показатели алмазных паст

Зернистость пасты	Концентрация алмазного порошка, %, в пасте		Цвет пасты и этикетки
	Н	П	
60/40	10	20	Красный
40/28	7	14	Голубой
28/20	7	14	
20/14	5	10	Зеленый
14/10	5	10	
10/7	3	6	Желтый
7/5	3	6	
5/3	2	4	
3/2	2	4	
2/1	1	2	
1/0	1	2	

дотвращение их коагуляции достигаются введением в пасту аэросила и изоамилацетата.

По степени вязкости (консистенции) пасты разделяют на следующие виды: твердые (Т), густые (Г), мазеобразные (М) и жидкие (Ж). Алмазные пасты бывают только твердые и мазеобразные. Другие пасты, например из эльбора, изготавливаются всех консистенций. Составы эльборовых паст приведены в табл. 17. Эти пасты выпускаются высокой (В), средней (С), низкой (Н) и пониженной (П) концентрации.

Качественные показатели «твердых» паст зависят не только от концентрации абразивного порошка, но и от равномерного распределения зерен в пасте, которое во многом определяется смачиваемостью зерен основными компонентами пасты (см. гл. IV). Пасты из «мягких» материалов (мягкие) изготавливаются на основе окиси хрома, окиси железа, венской извести, талька и других материалов. Для доводки и полирования деталей в оптико-механической промышленности широко исполь-

Таблица 17

Составы эльборовых паст

Зернистость микропорошка	Концентрация зерен	Содержание микропорошка, %	Консистенция пасты	Зернистость микропорошка	Концентрация зерен	Содержание микропорошка, %	Консистенция пасты
ЛМ40	В С Н	60 40 20	Т, Г Г, М М	ЛМ10, ЛМ7 ЛМ5	В С Н	10 8 6	М, Ж М, Ж М, Ж
ЛМ28	В С Н	40 20 10	Т, Г Г, М М	ЛМ3	В С Н П	8 6 5 0,5	Ж Ж Ж Ж
ЛМ20, ЛМ14	В С Н	20 10 8	М М М, Ж	ЛМ1	В С Н П	6 4 2 0,5	Ж Ж Ж Ж

Таблица 18

Составы паст ГОИ

Условное название групп	Номер пасты	Содержание, вес. %						
		окиси хрома	силикагеля	расщепленного жира	олеиновой кислоты	двууглекислоты	керосина	стеарина
Грубые	50	86	2	5	—	—	2	5
	40	85	2	5	—	—	2	5
	35	81	2	5	—	—	2	10
	30	81	2	5	—	—	2	10
	25	81	2	5	—	—	2	10
	20	81	2	5	—	—	2	10
Средние	15	80	2	10	—	—	2	6
	10	75	2	10	—	—	2	11
Тонкие	7	75	1,8	10	2	0,2	2	9
	4	73	1,8	10	2	0,2	2	11
	1	70	1,8	10	2	0,2	2	14

зуются пасты Государственного оптического института (ГОИ). Они изготавливаются трех групп: грубая (светло-зеленого цвета), средняя (зеленого цвета) и тонкая (черного цвета с зеленоватым оттенком).

Номер пасты ГОИ соответствует ее абразивной способности (табл. 18). Например, пасты с абразивной способностью 20 мкм имеют номер 20. Для усиления полирующего действия тонкие пасты ГОИ изготавливаются одновременно со стеариновой и олеиновой кислотами.

В промышленности для полирования черных и цветных металлов введена также стандартная полировальная хромовая паста (ГОСТ 8217—56), которая, как и пасты ГОИ, готовится из окиси хрома, стеарина и олеиновой кислоты, дополнительно вводится парафин. По

внешнему виду паста представляет собой однородные плотные бруски зеленого цвета, на изломе которых допускаются небольшие единичные поры. Физико-химические свойства пасты должны соответствовать данным, приведенным в табл. 19.

В таких отраслях промышленности, как авиационная, автомобильная, тракторная, станкостроительная и др., большое количество металлических деталей или гальванических покрытий на них подвергается

Таблица 19

Состав и свойства хромовой пасты

Показатели	Норма
Содержание, %:	
окиси хрома	62—65
органической основы	35—38
зерен окиси хрома размером более 45 мкм парафина	—
температура каплепадения органической основы, не менее	10—12
твердость*, не более	44° С (317° К)
Полирующая способность пасты на образцах из закаленной стали 13Х:	50
съем металла, мг/см ² , не менее	3
максимальная глубина оставшихся на поверхности рисок, мкм	0,5
класс шероховатости, в пределах	11—14-й

* Определяется глубиной проникновения в пасту стандартной стальной иглы в делениях прибора «Пенетрометр».

полированию до зеркальной чистоты. Для декоративной обработки используются и подмазывающие пасты. Составы паст, применяющихся для этих целей, приведены в табл. 20.

Окись хрома, окись алюминия, крокус оставляют царапины на полируемой поверхности. Более тонкими полировальными пастами являются пасты на основе венской извести. Для полирования золота и серебра, а также других благородных металлов широко используют пасты, изготовленные из кристаллической окиси железа (красовика).

Большинство полировальных паст, приведенных в табл. 20, и почти все рассмотренные выше доводочные смеси являются водонерастворимыми. Наряду с положительными качествами водонерастворимые пасты имеют ряд недостатков: трудности растворения и снятия пасты с детали после обработки и сложность в организации рабочего места доводчика. При снятии пасты с детали возможно даже ухудшение качества обработанной поверхности. Так, известно, что механическое удаление остатков водонерастворимых паст с поверхности шариков иногда приводит к снижению шероховатости обработанной поверхности на 1—2 класса.

В связи с возрастающим применением тонких отделочных операций в последнее время все больше ощущается необходимость в создании

Составы нестандартных паст для декоративного

№ п. п.	Сухая меловая пудра или тальк	О арок колчедана	Электрокорунд ЭБ N5—N3	Электрокорунд ЭБ M14—M7	Маршалит	Шаждак (микроновая пыль)	Кирпичная пыль	Венская известь	Окись железа	Глинозем прокаленный	Каолин препаированный	Окись хрома техническая	Стеариновая кислота	Олеиновая кислота	Жир животный технический (сало)
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75	15	2	6
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	—	5	3
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	77	—	—	19	4	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—	36	—	—	36	20	—	3
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	55	—	8	30	7	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	73	14	—	—
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80,3	17	1	—
8	—	—	—	—	—	—	—	73,1	—	—	—	—	18,5	1	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	65	—	—	10	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	36,8	—	36,8	—	13,2	—	—
11	—	—	—	—	—	—	—	—	36,5	—	—	36,5	20,4	4,4	—
12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	36,8	36,8	13,2	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68	—	17	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35,6	—	35,6	8,8	—	4,4
15	—	—	—	—	—	—	71,8	—	—	—	—	—	23,0	—	1,5
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	35—40	—	35—40	—	—	—
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	66,5	72—80	—	—	—	—	—	—	—	33,5
19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,0	—	53,0	14,4	—	—
20	—	—	—	—	—	—	72,3	—	—	—	—	—	15,4	—	7,5
21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	10	10
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	23	4	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70	20	—	—
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72	13	2	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	73	—	—	—	18	—	9
26	—	—	—	72	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	—	—	—	70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	39,4	—	39,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,8	—	2,0
29	—	—	80,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6,5	—	4,0
30	—	—	—	—	—	—	—	—	76,6	—	—	—	18,8	—	—
31	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,5
32	—	—	—	—	—	—	—	27	—	—	38	—	—	—	—
33	—	—	—	80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9
34	—	—	—	—	65,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5,0	5,0	—
36	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Цифрами в скобках обозначены следующие материалы: 1 — алюминий и его сплавы; 2 — кое отложение хрома; 6 — электролитическое отложение меди; 7 — электролитическое

шлифования и полирования металлических изделий

Парафин	Церезин	Канифоль	Пчелиный воск	Скипидар	Жирная кислота фракций C ₁₇ —C ₂₀	Жирная кислота фракций C ₂₁ и более	Смазка УС-3 (солидол Т)	Гудронное сало	Петролатум	Вазелин технический	Назначение пасты*
—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (5)
22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (5, 7)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (1)
—	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (6)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Глянцевание (1)
—	—	—	—	—	—	—	—	13	—	—	Полирование (1, 2, 4, 5, 7)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (4, 5, 6, 7)
5,4	2,0	—	—	—	—	—	1,7	—	—	—	Полирование (2, 3, 5, 8)
—	14,5	—	8,0	2,5	—	—	—	—	—	—	Полирование (6, 7)
—	—	—	—	—	—	—	—	13,2	—	—	Полирование (4, 5)
2,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (3)
—	—	—	—	—	—	—	—	13,2	—	—	Полирование (3, 6, 8)
—	—	—	—	—	—	—	—	15	—	—	Полирование (6, 8)
—	13,4	—	—	2,2	—	—	—	—	—	—	Полирование (6, 10)
—	1,5	—	—	2,2	—	—	—	—	—	—	Полирование (1, 7, 8, 9, 10)
3	—	—	—	—	—	—	—	17—27	—	—	Полирование (3, 5, 6, 7, 9)
4	—	—	—	—	—	—	—	16—24	—	—	Шлифование декоративное (3, 9, 10)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Подмазка шлифкругов
5,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (1, 3, 5, 7, 9, 10)
4,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Декоративное шлифование (1, 3, 9, 10)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Подмазка при зеркальном полировании
8	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (3)
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (1, 7)
13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (1, 5)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Полирование (9)
—	—	—	—	—	18	10	—	—	—	—	Полирование (2, 3, 4, 9)
—	—	—	—	—	30	—	—	—	—	—	Полирование (2, 3, 4, 9)
9,4	—	—	—	—	—	—	—	—	2,0	—	Полирование (1)
8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	1,5	—	Полирование (1)
—	3,0	—	—	—	—	—	1,5	—	—	—	Полирование (2, 3, 5, 6, 7, 8)
—	12,9	—	—	2,2	—	—	—	—	18,4	—	Полирование (6)
13,6	—	—	—	—	—	—	43,4	—	43,0	—	Подмазка кругов при матировании
10	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	То же
25,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Подмазка для полировальников
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	Глянцевание (5)
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Глянцевание (5)

медь и ее сплавы; 3 — углеродистые стали; 4 — нержавеющие стали; 5 — электролитическое отложение никеля; 8 — серебро; 9 — латунь; 10 — цинковые сплавы.

паст, растворимых водой, которые могли бы успешно заменить водонерастворимые пасты. Известных в промышленности водорастворимых паст немного. Рассмотрим некоторые из них. Паста, предложенная Я. Я. Ковалинским [49], имеет следующий состав: 60—75 вес. % абразивного порошка; 20—22 вес. % крахмального клейстера, полученного заваркой крахмала в воде из расчета 35 г крахмала на 1 л воды; 8—15 вес. % мыльной воды, содержащей 25 г ядрового мыла на 1 л воды. После обработки деталей такой пастой их очищают от остатков ее промывкой водой при температуре 30—40 °С (303—317 °К).

В СКБ химизации народного хозяйства Латвийской ССР разработана паста для полировки лакокрасочных покрытий деталей автомобилей. Входящие в состав пасты компоненты берут в следующих соотношениях: аэросила 4—10 вес.%; препарата ОС-20 марки В 4—7; отбеленного воска-монтана 3—13; парафина 3—7; церезина 1—3; масла веретенного (индустриального) 1—4; смазки «Нефтегаз-204у» 1—3; оксидифенила 0,5—1; уайт-спирта 30—38; воды 25—41,5 вес.%. Аэросил (двуокись кремния) придает стойкость к окислительным процессам, кроме того, он усиливает гидрофобность и антистатические свойства образующейся при полировке пленки, придавая ей температуроустойчивость. В состав защитной смазки «Нефтегаз-204у» входит 75% нитрированного масла, по 5% соединений алюминия и парафина, 1,5% окисленного петролатума и немного других веществ. Смазка обладает высокими адгезионными свойствами.

Авторами [50] предложена водорастворимая паста, предназначенная для шлифования и полирования поверхностей металлических деталей, изготовленных из цветных сплавов, следующего состава: 29,5% окиси хрома; 29,5 микропорошка М10; 5 глицерина; 4 вазелина; 1 мочевины; 1 оксиэтилированного алкилфенола; 16% хозяйственного 60%-ного мыла и 14% воды.

Применение некоторых водорастворимых паст и суспензий может вызвать коррозию металла. Такому химическому разрушению препятствуют ингибиторы коррозии, введение которых в состав среды придает ей новое фазовое состояние. Механизм действия такой среды определяется не только химической природой отдельных ее компонентов, но и физико-химической характеристикой смеси в целом. Один из основных параметров фазового состояния этих смесей — межмолекулярное взаимодействие ее компонентов. Механизм этого взаимодействия, так же как и взаимодействие среды в целом с обрабатываемыми поверхностями, изучен недостаточно.

4. Приготовление паст и суспензий

Приготовление паст и суспензий в условиях машиностроительных предприятий чаще всего производится на специальном участке или в лаборатории. На каждый абразивно-доводочный состав в лаборатории отрабатывается соответствующий технологический процесс, включающий ряд операций, от соблюдения последовательности и точности выполнения которых зависит качество приготовленной пасты или суспензии.

Рассмотрим приготовление водонерастворимых паст.

1. Все жидкие компоненты состава перед шлифованием фильтруют. Стеарин и парафин при этом предварительно расплавляют.
 2. Приготавливают (очищают, сушат и маркируют) посуду.
 3. Производят контроль исходных продуктов, их взвешивание согласно рецептурному составу.
 4. Емкость с парафином и стеарином нагревают в вытяжном шкафу до полного расплавления компонентов. В расплавленную смесь вводится олеиновая кислота, полученная композиция перемешивается и нагревается до 60 °С (333 °К). Затем в нее при тщательном перемешивании небольшими порциями вводится абразивный порошок.
 5. Смесь нагревают до температуры 80—100 °С (353—373 °К), при которой в емкость вводят масло, например костное.
 6. Для получения гомогенного (однородного) состава при постоянном перемешивании производят дальнейший нагрев до температуры 110 °С (383 °К), после чего емкость снимают с нагревателя.
 7. Для удаления случайно попавших механических примесей пасту фильтруют через двойной слой марли.
 8. При необходимости вводят краситель: для получения серого цвета — спиртовой раствор нигрозина, вишневого — спиртовой раствор родамина Ж и т. д.
 9. При тщательном перемешивании пасту охлаждают до 40 °С (313 °К).
 10. Производят контроль состава пасты на равномерное распределение абразивных зерен. Для этого обычно используют бинокулярный микроскоп МБР-1. В случае неравномерного распределения абразивных зерен, установленного на основе проб, взятых из нескольких мест емкости, производят повторный нагрев пасты до 110 °С (383 °К) и ее тщательное перемешивание.
 11. При необходимости вводят дополнительные компоненты: канифоль, скипидар, керосин. Керосин и скипидар вводятся при температуре ниже 40 °С (313 °К), а канифоль — при более высокой — 70 °С (343 °К) и выше.
 12. Пасту охлаждают до сметанообразного состояния и разливают в мерные тубики из парафинированной бумаги или специальную посуду, а затем их охлаждают до комнатной температуры.
- Для определения консистенции пасты и разделения ее на категории используется метод пенетрации (определение числа проницаемости). Применяется специальный прибор — пенетромтр. Методика нахождения числа проницаемости приведена в ГОСТ 16877—71 и 8217—56.
- Эксплуатационные показатели паст существенно зависят от однородности зернового состава и качества абразивных порошков. Абразивные порошки для средних и грубых паст машиностроительные предприятия получают с абразивных заводов в готовом виде. Для тонких абразивных паст зернистостью 1—3 мкм широко используется мелкодисперсная окись алюминия. Порошки для таких паст часто потребители готовят сами. Способы получения мелкодисперсной окиси алюминия на различных заводах несколько отличаются друг от друга, но в основном технологический процесс состоит из следующих операций: сушки, раз-

мола, отмучивания, отстаивания, фильтрации, повторной сушки, просеивания и прокаливания.

Наиболее ответственны операции отмучивания и прокаливания. Отмучивание представляет собой гранулометрический анализ порошка, основанный на различии в скоростях свободного осаждения (седиментации) из суспензий частиц различного размера. Этот метод позволяет, разделяя смесь зерен на отдельные классы крупности, определять их количество. Способ свободного осаждения для получения сверхтонких микропорошков (1 мкм и менее) практически не пригоден, так как вследствие малого размера частиц силы, выталкивающие частицы из жидкости, препятствуют их осаждению.

Для получения сверхтонких микропорошков применяют разработанный во ВНИИАШ способ — осаждение частиц под действием центробежных сил. Для этого используют специальные центрифуги с двумя стаканами.

Чтобы определить время, необходимое для свободного осаждения частицы, воспользуемся следующей формулой [51]:

$$t = \frac{18\mu}{\Delta\delta\omega^2 D^2} \ln \frac{R}{r}, \quad (1)$$

где t — время осаждения, *сек*; $\Delta\delta$ — разность плотностей дисперсной фазы и среды, в которой производится осаждение, *г/см³*; ω — угловая скорость вращения, *сек*; D — диаметр частицы, *мкм*; μ — вязкость среды, *пуаз*; R — расстояние от оси вращения до уровня слива, *мм*; r — расстояние от оси вращения до начального уровня суспензии, *мм*.

Центробежное осаждение в сотни раз сокращает продолжительность процесса, а также в 1,6—2,8 раза сужает диапазон предельных значений размеров зерен. Практически этот способ позволяет получать сверхтонкие абразивные порошки любой мелкой зернистости.

Режущая способность зерен окиси алюминия зависит от режима термической обработки (прокаливания). Хорошие результаты дает двойное прокалывание: предварительное при температуре 1000 °С (1273 °К) и окончательное при 1100—1200 °С (1373—1473 °К). Продолжительность прокаливании до 2 *час*.

Технология приготовления алмазных и эльборовых паст на жировой основе подобна технологии абразивных паст. Для приготовления алмазных и эльборовых паст в последнее время часто используют жир свиной расщепленный. В этом случае в описанный выше технологический процесс вводится дополнительная операция — расщепление жира. Перетопленный расплавленный до однородной массы жир нейтрализуют 30%-ным раствором NaOH. Контроль щелочной реакции осуществляют по фенолфталеину. При появлении яркой малиновой окраски нейтрализацию прекращают. Раствор жира с NaOH медленно нагревают, не доводя до кипения. Затем смесь отстаивается, ее сливают и фильтруют. Полученную массу постепенно подогревают до 50 °С (323 °К) и нейтрализуют 20%-ным раствором серной кислоты. Контроль реакции производят по метилоранжу. Смесь охлаждают проточной водой, при этом

она разделяется на ряд слоев: верхний — мазеобразное вещество белого цвета — расщепленный жир; нижние — вода и глицерин. Жир отделяют от жидкости и промывают. Воду отжимают фильтровальной бумагой или марлей. После этого жир помещают в сушильный шкаф с температурой 120—150 °С (393—423 °К), выдерживают некоторое время, извлекают из шкафа и охлаждают проточной водой. Образовавшуюся при этом внизу воду сливают, она должна иметь нейтральную реакцию. Контроль производится по метилоранжу. При необходимости повторяют промывку жира. Расплавление жира в сушильном шкафу и охлаждение повторяют до тех пор, пока не прекратится отстаивание воды.

Перед употреблением иногда необходимо проверить содержание алмазного, эльборового или абразивного порошка в пасте. Для такого контроля можно использовать методику, разработанную в УкрНИИСМИ. Она основана на способности вспомогательных компонентов, входящих в состав пасты, растворяться в бензине, ацетоне, бензоле, петролейном эфире и других веществах. Для этого из разных мест с помощью конусообразной трубки, изготовленной из алюминиевой фольги, отбирают пробу весом около 1 г. Пробу тщательно перемешивают и подогревают в термостате до 65—85 °С (338—358 °К). Затем с помощью растворителя неабразивную часть пасты переводят в жидкое состояние. После полного осветления жидкой части образующуюся над абразивным порошком, осевшим на дно, верхнюю часть сливают и заливают новую порцию растворителя. Операцию повторяют три-четыре раза. После тщательной промывки чистоту зерен проверяют под микроскопом МБС-2 при 25—50-кратном увеличении. Затем стакан с порошком помещают в термостат и сушат при 105—110 °С (378—383 °К) до постоянного веса. После чего определяют процентное содержание A порошка в пасте:

$$A = \frac{a \cdot 100}{m}, \quad (2)$$

где a — масса высушенного порошка, *г*; m — масса пасты, *г*. Для взвешивания целесообразно применять аналитические весы АДВ-200.

Следует иметь в виду, что в окрашенные пасты вместе с красителем добавляется окись титана. Поэтому после удаления жировой основы для растворения окиси титана оставшийся порошок обрабатывают концентрированной серной кислотой. Процесс ведется при умеренном нагреве в течение 3—4 *час*. После этого раствор охлаждают до полного осветления верхнего слоя, который затем сливают. Порошок несколько раз промывают водой до нейтральной реакции, а потом спиртом. Сушат его, как и в первом случае, в термостате. Точность определения содержания абразивных материалов по данной методике $\pm 0,1\%$.

Как указывалось выше, режущая способность окиси алюминия зависит от режима прокаливании. При изготовлении паст иногда необходимо проводить проверку качественных показателей паст, таких, как абразивная способность, шероховатость обработанной поверхности и т. д. Их проводят в соответствии с методиками, приведенными в соответствующих стандартах (ГОСТ 16877—71, 8217—56 и др.).

Приготовление водорастворимых паст значительно проще и требует меньших затрат. Технологию приготовления этих паст рассмотрим на примере пасты, приведенной в работе [50]. Требуемое количество воды доводят до кипения, добавляют глицерин, измельченное мыло, вазелин и мочевины. В расплавленную смесь засыпают окись хрома и микропорошок М10, а также добавляют оксигетилированный алкилфенол. Всю массу нагревают, перемешивая до получения однородной массы, кипятят до сметанообразного состояния. Готовую смесь разливают в формы для затвердения и последующей расфасовки.

Для приготовления паст в небольших количествах используют эмалированные или фарфоровые емкости, переносные электрические подогреватели или специальные малогабаритные пастоварки. Для приготовления больших количеств паст, необходимых в условиях крупносерийного и массового производств, применяют специальные механизированные пастоварки. Такие пастоварки пока предприятия-потребители изготавливают собственными силами, они разнообразны по принципу действия, конструктивному исполнению и надежности в работе. Хорошо зарекомендовали себя на практике пастоварки Горьковского автозавода.

Технология приготовления суспензий значительно проще, чем паст. Вначале из одной или смеси нескольких жидкостей или веществ, смешанных в требуемом соотношении, готовят дисперсионную среду, потом при непрерывном перемешивании добавляют «фазу», т. е. абразивный материал. С течением времени абразивные частицы оседают на дно и стенки емкости. Поэтому перед употреблением суспензии перемешиваются. Такое смешивание может производиться как вне, так и на самом станке или на установке с помощью специальных устройств-смесителей. Вместе со смесителями часто изготавливаются и дозаторы, с помощью которых в процессе доводки отмеривается требуемая порция суспензии.

5. Выбор паст и суспензий

При подборе паст и суспензий для обработки различных деталей возможны два пути:

1) выбор паст и суспензий из числа промышленно апробированных составов;

2) последовательный подбор и априорное составление новых рецептов.

Анализ приведенных выше составов показывает, что подобрать пасту или суспензию из уже известных рецептов так, чтобы она отвечала заданным условиям обработки конкретной детали, очень трудно, а иногда практически и невозможно. Известных, хорошо апробированных составов по сравнению с многообразием материалов и условиями обработки деталей немного. Каталогов по составу и применению паст и суспензий, которые облегчили бы процесс подбора, также нет. Общее количество рецептов паст и суспензий непрерывно увеличивается. В настоящее время нам известно более 300 составов. Пасты (суспензии), применяемые на различных предприятиях, часто резко отличаются друг от друга. Назре-

ла необходимость провести анализ и обобщение многочисленных составов паст и суспензий, отобрать наиболее целесообразные из них и для рекомендованных разработать режимы обработки различных материалов. Это большая, трудоемкая, но актуальная проблема. Для решения ее в качестве исходных можно использовать рекомендации и материалы, приведенные в данной главе.

Составление рецептов путем последовательного апробирования отдельных компонентов с целью определения оптимального состава занимает много времени. Кроме того, здесь есть значительные трудности, которые прежде всего связаны с тем, что абразивная и жидкотекучая части паст и суспензий могут оказывать на результаты обработки существенное влияние. Известны случаи, когда для доводки деталей из одной и той же стали применяются пасты различных составов. Очень часто обрабатываемые материалы, объединяемые одним названием (например, нержавеющие стали, алюминиевые сплавы и т. д.), имеют различные механические свойства и требуют применения разных по составу паст. Подбор затруднен и тем, что современная абразивная промышленность располагает значительным набором сверхтвердых материалов, многие из которых близки по своим свойствам.

Исходные данные для выбора паст и суспензий чаще всего следующие.

1. Вид обрабатываемой поверхности, ее форма и размеры. Требования, предъявляемые к качеству поверхности и точности обработки, надежности и долговечности детали.

2. Исходное состояние обрабатываемой поверхности (погрешность геометрической формы, шероховатость, наличие следов некачественно выполненной предыдущей обработки).

3. Характеристика обрабатываемого материала (химический состав, физико-механические свойства, состояние и структура поверхностного слоя) и притира.

4. Последовательность обработки; метод и способ установки деталей; размеры рабочих органов станка.

5. Режим обработки — рабочая скорость относительного перемещения детали и притира (полировальника), условия поддержания давления, способ обновления абразивно-доводочного материала.

6. Экономическая эффективность выбранного состава паст (суспензий).

Чаще всего выбор паст и суспензий начинается с подбора абразивного материала. Как правило, при выборе абразивных (алмазных, эльборовых и др.) микропорошков и их зернистости анализируются требования, предъявляемые к качеству обрабатываемой поверхности. В зависимости от требуемого класса шероховатости и точности обработки доводка или полирование выполняются за одну или несколько последовательных операций, которые отличаются величиной снимаемого припуска. Чем выше заданные значения шероховатости и точности обработки, тем больше доводочных операций необходимо осуществить. Так, при исходной шероховатости $R_a=0,2—0,5$ мкм (8—9-й классы) для получения 13—14-го классов шероховатости и точности 0,1—0,3 мкм необходимо выполнить не менее четырех доводочных операций:

Рекомендации по выбору паст из эльбора

Зернистость паст	Операция доводки	Снимаемый припуск, мм	Рекомендуемый материал притира	Получаемый класс шероховатости поверхности
ЛМ40 ЛМ28 ЛМ20	Предварительная	0,05—0,02	Чугун, сталь	8—9-й
ЛМ14 ЛМ10 ЛМ7	Чистовая	0,02—0,01	Чугун, текстолит, самшит, цветные металлы	10—11-й
ЛМ5 ЛМ3 ЛМ1	Окончательная	0,002—0,003	Чугун, липа, самшит, береза, войлок, фетр, велюр, замша, батист	11—13-й

1) грубую — припуск на обработку на сторону 0,03—0,08 мм (для притирки круглых деталей припуск до 0,05 мм, для плоских 0,04—0,08 мм), точность обработки (отклонения от требуемой геометрической формы доведенной поверхности) 3—5 мкм, шероховатость поверхности после обработки до 10-го класса;

2) получистовую — припуск 0,005—0,01 мм, точность 1,0—2,5 мкм, шероховатость поверхности 11-го класса;

3) чистовую — припуск 0,002—0,005 мм, точность 0,2—0,5 мкм, шероховатость поверхности — 12-го класса;

4) тонкую — припуск 0,0005—0,001 мм, точность обработки 0,1—0,3 мкм, шероховатость поверхности 13—14-го классов.

Для получения 12-го класса шероховатости и точности 0,2—0,5 мкм часто достаточно трех операций: грубой, получистовой и чистовой. Соответственно шероховатость поверхности 11-го класса и точность 1,0—2,5 мкм могут быть достигнуты за две операции, а шероховатость 10-го класса и точность 3—5 мкм — за одну операцию после снятия припуска 0,02—0,05 мм.

Назначение оптимальной величины припуска на обработку представляет собой сложную задачу. Малый припуск может не обеспечить желаемой точности из-за неполного удаления дефектного поверхностного слоя, полученного на предыдущей операции, большой припуск может привести к снижению качества обработки и увеличению себестоимости. Обрабатываемый материал, величина припуска на обработку и получаемая после нее шероховатость — отправные данные для выбора абразивного материала и его зернистости. Рекомендации по выбору абразивного материала в зависимости от обрабатываемого частично приведены ниже. Дополнительные данные можно найти в работе [2] (см. табл. 1 и 2). При выборе зернистости абразива следует подбирать зерна абразивного материала такой крупности, чтобы они не «утопали» в микронеровностях обрабатываемой поверхности и не были настолько крупными, чтобы могли оставлять на поверхности глубокие риски-царапины. Зернистость алмазной пасты и шероховатость поверхности, получаемая после обработки деталей из твердых сплавов, находятся в следующей зависимости: алмазные зерна 60/40 в пасте обеспечивают получение шероховатости не ниже 9б класса, зерна 40/28 — не ниже 9в класса и т. д. (см. табл. 10). ЦНИТА в зависимости от требуемой шероховатости поверхности рекомендует при доводке деталей топливной аппаратуры применять следующие зернистости: для получения 8-го класса — Э8—Э10, 9-го — ЭМ28—Э5, 9—10-го — ЭМ10—ЭМ20, 10-го — ЭМ5—ЭМ7, 11-го — ЭМ3, 12-го класса — ЭМ1, АСМ 3/2.

По данным абразивного завода «Ильич», зернистость паст из эльбора принимается в соответствии с табл. 21.

Замена абразивных паст пастами из эльбора на доводочных операциях деталей из сталей и цветных металлов при правильном ведении процесса позволяет увеличить производительность до 2 раз.

Достижение заданной шероховатости поверхности во многом зависит от однородности зернового состава шлифпорошков и микропорошков [53, 54]. Резкое улучшение шероховатости поверхности деталей и устра-

нение отдельных дефектов (рисок, точек, царапин) достигаются при уменьшении до минимума предельной фракции порошка.

Для окончательных доводочных операций рекомендуется применять микропорошки с повышенной размерной однородностью зернового состава. С изменением зернистости абразива изменяется соотношение между процессами резания-царапания и химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала. На это изменение существенное влияние оказывает характер движения зерна в зоне резания. Если абразивные зерна в процессе работы тем или иным способом закреплены или шаржированы в притир, то с применением более крупных зернистостей доля механического резания-царапания возрастает. Использование более мелких зернистостей, напротив, способствует увеличению химического воздействия пасты или суспензии на обрабатываемый материал. Вместе с тем возрастает влияние неабразивной части пасты. Под действием кислот или других активных веществ пасты или суспензии на обрабатываемой поверхности образуются пленки окислов, солей и других химических соединений, которые способствуют уменьшению и предотвращению адгезионных и адсорбционных процессов.

При выборе пасты или суспензии необходимо учитывать предполагаемое образование пленок и других химических соединений. При этом следует стремиться к тому, чтобы пленки были мягкими, рыхлыми и легко удалялись под действием абразивных микропорошков и субмикропорошков. Опыты показывают, что за счет выбора эффективных абразивных компонентов паст и суспензий производительность обработки можно увеличить более чем в 1,5 раза и уменьшить шероховатость обрабатываемой поверхности до 3—4 разрядов.

Выбор абразивного материала для приготовления паст зависит от свойств обрабатываемого материала и состояния поверхностного слоя детали. «Мягкие» стали легче поддаются обработке, чем твердые. Однако качество обработанной поверхности деталей из мягких материалов зна-

чительно ниже. Для доводки деталей из сталей можно использовать шлиф- и микропорошки из электрокорунда Э (нормального, белого, титанистого, хромистого), монокорунда, синтетического и натурального алмаза и эльбора. Доводку твердосплавных деталей целесообразно осуществлять микропорошками карбида кремния КЗ, карбида бора В₄С или алмазными. Абразивные пасты на основе карбида кремния эффективны при обработке материалов с низким сопротивлением разрыву (чугун, бронзовое или латунное литье). Кварцевые и кремниевые пластины доводятся обычно электрокорундами, карбидом кремния и алмазными микропорошками. Последние применяются также и для доводки керамики, ферритов и ситаллов.

Окончательную доводку деталей из сырой стали, а также из мягких материалов (легко шаржирующихся абразивами), таких, как бронза, латунь, медь и алюминиевые сплавы, рекомендуется выполнять материалами пониженной твердости (окись хрома, окись алюминия, крокус и прокаленный глинозем). Эти же пасты широко применяются при декоративном полировании и глянцеваии металлических изделий. Рекомендации по выбору полировальных паст приведены в табл. 22. При выборе доводочных и полировальных паст необходимо, чтобы состав пасты соответствовал обрабатываемому материалу, а дисперсность абразивного материала — выполняемому переходу.

Особенностью некоторых мягких абразивных материалов (окись хрома, окись железа) является их способность оказывать на обрабатываемую поверхность не только механическое, но и химическое воздействие. Оно характеризуется образованием окисной пленки на обрабатываемой поверхности. Благодаря этому окислы металлов имеют повышенную полирующую способность по сравнению с карбидами. Особенно велико влияние на полирующую способность окислов металлов с переменной валентностью, таких, как окись хрома, окись железа, двуокись марганца. Высокая стоимость и дефицитность окиси хрома ограничивают ее применение. В качестве частичного или полного заменителя окиси хрома хорошо себя зарекомендовали прокаленный глинозем, двуокись марганца, окись железа, трепел и др.

Во ВНИИАШ исследованы абразивная способность паст и качество глянцеваания полировальными пастами, которые изготовлены из названных материалов. Сравнительные данные по абразивной способности приведены в табл. 23.

Опыты по абразивной способности проводились на пластинках размером 40×20×5, изготовленных из стали Ст. 3 с исходной шероховатостью по 7-му классу. На круг ПП 105×30×16 мм, выполненный из технического войлока, через каждые 20 сек наносилась паста со связкой, состоящей из 25 весовых частей синтетических жирных кислот и 10 частей парафина. Круг имел 2120 об/мин (222,6 рад/сек), стальная пластинка — 38 дв.ход/мин и величину хода 40 мм; вес груза, прижимающего стальную пластинку к вращающемуся кругу, составлял 0,5 кг, время работы — 60 сек. Абразивная способность оценивалась по уменьшению веса стальной пластинки. Согласно табл. 23, окись хрома имеет самую малую абразивную способность.

Таблица 22
Рекомендации по выбору абразивных микропорошков и паст для декоративного шлифования и полирования металлических изделий (из опыта ВНИИАШ, ЗИЛ, ГАЗ и др.)

Операция	•Класс шероховатости поверхности после обработки	Абразивно-полировальный материал					
		сталь углеродистая закаленная	закаленная сталь	нержавеющая сталь	чугун серый	алюминий	медь
Грубая обдирка	6-й	ЭН40—25	ЭБН25—16	ЭБН12	КЧН16	КЗН25—16, ЭН25—16	КЧН50—40
Шлифование	7—8-й	ЭН12—8	ЭБН10—8	ЭБ8 и паста для подмывания	КЧН10	КЗН12—8 ЭН10	КЧН25—16
Предварительное полирование	8—9-й	ЭН6—4	ЭБН5—4	ЭБН4—3 и паста для подмывания	КЧН8	ЭН6—4, окись алюминия ЭН5—4	КЧН12—8, паста из сапфировой пудры
Окончательное полирование	9—11-й	Пасты на основе окиси хрома (хромовал, ГОИ, др.); паста на основе окиси железа, окиси железа+окиси хрома		Пасты на основе окиси хрома (хромовал, ГОИ, др.); паста на основе окиси железа		Пасты на основе окиси хрома	Пасты на основе окиси железа (крокусные) и глинозема
Глянцеваание (зеркальное полирование)	11—14-й	Пасты на основе окиси хрома		Пасты на основе прокаленного глинозема		—	—
	11—14-й					—	—

Исследование качества глянцеваия проводилось на сталях 3Х13 и Ст.3, латуни Л62, дюралюминии Д1 и алюминии АМ1 пастами на основе глинозема, окиси хрома и других абразивных материалов. Результаты исследования представлены в табл. 24 (в скобках указано содержание абразивной части пасты в весовых частях, остальное (дополнение до 100 частей) — связка). Во всех пастах связкой служила смесь, которая состояла из 82 весовых частей стеарина и 18 частей олеиновой кислоты. Знаком + отмечен хороший глянец, — — плохой.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что при глянцевании сталей наиболее предпочтительны пасты на основе прокаленного глинозема, а не окиси хрома. При глянцевании мягкого алюминия и дюралюминия хорошие результаты получены при использовании глинозема или трепела с небольшими (до 4 частей) добавками окиси хрома. Для латуни может быть использован как глинозем, так и окись хрома с добавками криолита или белого электрокорунда, или пыли котельной. Хорошие результаты дает паста, состоящая из повышенного количества окиси хрома и глинозема. Применение в этом случае трепела или глинозема с небольшой добавкой окиси хрома не дало положительных результатов.

Таблица 23

Абразивная способность паст с различными материалами

Абразивный материал	Абразивная способность, мг
Электрокорунд белый № 5—М20	60—64
Электрокорунд белый М14—М5	77—87
Карбид кремния зеленый М14	60
Глинозем прокаленный при 1550 °С (1823 °К) (мельче 40 мкм)	60
Окись хрома средняя (Ленинградского завода лаков и красок)	37

Таблица 24

Качество глянцевания металлических поверхностей

Состав абразивной части паст	Качество поверхности				
	3Х13	Ст. 3	Л62	Д1	АМ1
Глинозем (77)	+	+	+	+	—
Глинозем (38) и криолит (39)	—	—	+	—	—
Глинозем (31) и пыль котельная (31)	+	—	+	—	—
Глинозем (55) и окись хрома (8)	+	—	—	+	+
Глинозем (30) и окись хрома (41)	+	+	+	—	—
Трепел (30) и окись хрома (4)	—	—	—	+	+
Окись хрома (41) и электрокорунд белый М7 (30)	+	—	+	—	—
Окись хрома (41) и криолит (30)	—	—	+	—	—

Существенное влияние на результаты полирования и доводки оказывает также правильный подбор рецептуры неабразивной части паст и соотношения количества жидкости и абразива. Оптимальная концентрация абразивных зерен в полировальных пастах значительно выше, чем в доводочных, — составляет 55—70 %.

Концентрация «мягких» паст в значительной степени зависит от свойств абразивного материала. Если применяется абразивный материал с невысокой поверхностной активностью, то повышение концентрации его в пасте может замедлить образование поверхностной пленки и снизить интенсивность процесса полирования. В этих случаях целесообразно уменьшать содержание абразивного материала и соответственно увеличивать количество неабразивных поверхностно-активных материалов. Повышение концентрации абразивных материалов до 70—75 % снижает вязкость пасты и ухудшает условия ее нанесения на рабочий инструмент.

Концентрация зерен в твердых пастах также зависит от рода абразивного материала. Для алмазных микропорошков она составляет от 2 до 10 %, для остальных абразивных материалов — от 10 до 50, а иногда и до 70 %.

При подборе отдельных жидких компонентов неабразивной части можно воспользоваться приведенными выше рекомендациями и описаниями их свойств. Следует отметить, что в последнее время П. Д. Дудко проведены исследования по доводке металлических поверхностей с введением в состав пасты не только молочной кислоты (см. параграф 3 данной главы), но и анилина солянокислого. Получены хорошие результаты по доводке легированных закаленных сталей. Оптимальная концентрация этих веществ в пастах составляет соответственно 5—8 и 9—12 %. С увеличением твердости обрабатываемого материала концентрация неабразивных составляющих пасты может повышаться. Кроме отмеченных ранее веществ, для доводки и полирования кремния и других полупроводниковых материалов можно использовать растворы едкого натрия, едкого калия и других щелочей. При доводке и полировании корунда, керамических материалов хорошие результаты дает применение паст и суспензий, изготовленных на основе анионоактивных и неионогенных веществ с использованием в качестве рабочей жидкости (разбавителя) дистиллированной воды либо керосина или его смеси с минеральными или подсолнечным маслами.

При подборе паст и суспензий широко практикуется замена известных дорогостоящих жидкостей новыми, выпускаемыми современной химической промышленностью. Так, до недавнего времени на ГПЗ-11 для доводки шариков II степени точности применялась паста следующего состава: масло машинное — 48 %; стеарин — 19; парафин — 19; микропорошок М14 — 11; окись хрома — 3 %. Данный состав доводочной пасты имел ряд недостатков [52]. Была проведена работа по изысканию наиболее оптимального ее состава. Лучшие результаты как по производительности, так и качеству поверхности шариков были достигнуты при использовании пасты следующего состава: масло машинное — 56 %; арахин — 11,5; парафин — 17; микропорошок М14 — 13,5; окись хрома —

2%. В последнем составе пасты стеарин заменен арахином, поверхностно-активные свойства которого значительно выше. Кроме того, стеарин получается из животных жиров, поэтому его нежелательно использовать для таких целей. Арахин же, получаемый из масел бобовых растений, способствует более быстрому образованию на поверхности шариков окисных пленок, которые легко снимаются при доводке чугунами дисками, что ускоряет процесс обработки.

Уменьшение процентного содержания парафина и смесь его с арахином, а также увеличение содержания машинного масла способствуют лучшему перемешиванию компонентов. Это объясняется тем, что данное сочетание загустевает более медленно и вообще не затвердевает. В этом случае абразивный микропорошок М14 и окись хрома после перемешивания находятся во взвешенном состоянии, в результате чего достигается однородность доводочной пасты. Увеличение процентного содержания микропорошка М14 придало пасте лучшие режущие свойства. Уменьшение процентного содержания окиси хрома способствует сохранению полученной шероховатости и уменьшает вероятность образования рисок на последующих операциях.

При создании паст важна не только ее концентрация, но и консистенция. В случае применения твердых или мазеобразных паст их наносят на притир ровным слоем, предварительно растворяя. При доводке и полировании сталей в качестве растворителей применяются керосин, вода или некоторые маловязкие масла (вазелиновое, веретенное и др.). Детали из алюминиевых сплавов, меди и других цветных металлов доводятся пастами, изготовленными на основе масел. Для уменьшения загрязнения детали из керамики, ферритов, полупроводников чаще всего доводятся смесями на водной основе.

При выборе материала для жидкотекучей части паст и суспензий необходимо иметь в виду, что между вязкостью выбранной жидкости и зернистостью применяемого абразивного микропорошка существует определенная зависимость. Чем крупнее зерно, тем больше должен быть показатель вязкости жидкости, иначе зерна подвергаются интенсивному дроблению. Однако жидкости со слишком высоким показателем затрудняют внедрение зерен в притир и контакт их с деталью.

Применяемые для суспензий жидкости не должны разъедать и корродировать детали станка и обрабатываемое изделие, содержать вредные компоненты, неприятный запах, быстро портиться, загустевать, загораться, вспениваться, сильно нагреваться, оставлять пятен на одежде. Отработанные суспензии недопустимо сливать в канализацию.

Вязкость жидкостей для суспензий должна подбираться с учетом того, что в маловязкой жидкости возможно осаждение абразивных зерен. Для суспензий, содержащих зерна М14 и мельче, можно применять керосин, а для более крупных зерен — машинное масло.

Количество жидкости в пасте (смеси) должно быть достаточным для смачивания поверхностей притира, детали, абразивных зерен и металлической микростружки. При недостаточном количестве ее абразивные зерна перестают в зоне доводки вращаться, закрепляются в притире и работают как резцы, что ухудшает качество доводки.

Состав паст и суспензий должен быть откорректирован в зависимости от применяемого оборудования и режимов обработки. При большой скорости обработки, большом весе притира для паст выбирают более прочные абразивные зерна. При доводке отверстий изменение расположения доводочного шпинделя (вертикально или горизонтально) сказывается на консистенции применяемой пасты. На вертикальных внутридодочных станках для уменьшения утечки пасты следует использовать пасты твердой консистенции. Важным фактором, ограничивающим применение той или иной из выбранных паст, является ее стоимость. При сравнении паст, имеющих одинаковые технологические возможности, предпочтение отдается той из них, при использовании которой затраты на обработку одного и того же количества деталей меньше. Следует отметить, что указанный выше состав доводочной пасты, применяемой в настоящее время на ГПЗ-11 для доводки шариков II степени точности на операции первой доводки, более экономичен. Годовая экономия от внедрения составила около 3 тыс. руб. На эффективность применяемых паст и суспензий значительное влияние оказывает инструмент, в частности материал притира, доводочного диска или полировальника.

ИНСТРУМЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ СВОБОДНЫМ И ПОЛУЗАКРЕПЛЕННЫМ АБРАЗИВОМ

1. Притиры, доводочные диски, полировальники, абразивные ленты и шкурки

Обработка деталей машин и приборов свободным и полужакрепленным абразивом может производиться различными способами. Однако по поведению зерна в процессе работы можно выделить три основных вида обработки:

- 1) свободным абразивом, который в процессе работы может шаржироваться в инструмент;
- 2) абразивом, который до его использования принудительно шаржирован в инструмент;
- 3) тонкая обработка с помощью нешаржирующегося (невнедряющегося) в инструмент абразива.

Для того чтобы осуществить каждый из видов обработки, кроме абразивных зерен, паст или других составов, необходимы дополнительные инструменты, способные обеспечить размещение и удержание абразивных материалов.

Инструмент, применяемый при обработке свободным и принудительным шаржированным абразивом, должен размещать и удерживать абразивные зерна и пасту. Рабочая поверхность инструмента, который в этом случае определяется как доводник или притир, должна иметь высокую степень жесткости. От ее формы зависит окончательная форма доведенной поверхности. Чаще всего форма рабочей поверхности доводника соответствует форме поверхности детали, которая при помощи его будет обрабатываться.

Для обеспечения точной размерной обработки или же для достижения герметического соединения сопрягаемых поверхностей доводка производится с помощью притиров, а для придания детали только блестящей или зеркальной поверхности используются полировальники. Притиры для доводки плоских деталей (плоскостей, торцов цилиндров и т. д.) обычно изготавливаются в виде плит, брусков или дисков, для доводки наружных цилиндрических поверхностей — в виде различных дисков, колец и плит, для внутренних цилиндрических поверхностей — разжимных втулок, стержней. Для притирки резьбы применяются разрезные резьбовые кольца или резьбовые пробки, для доводки сферических поверхностей типа шариков — диски с различными канавками.

Габаритные размеры притиров изменяются в широких пределах. Для доводки используются притиры размером от нескольких миллиметров до 2—5 м. Размеры дисков-притиров отечественных плоскодоводочных станков изменяются от 280 до 1600 мм. Некоторые зарубежные фирмы выпускают плоскодоводочные станки с еще большим диаметром дисков-притиров. Например, притир станка мод. 3R 500/200 фирмы «Уолдрич Корбург» (ФРГ) имеет диаметр 5000 мм. При таких больших размерах сложно довести рабочую поверхность притира с требуемым отклонением от плоскостности 0,01—0,02 мм.

К притирам предъявляются следующие основные требования: правильный выбор материала; для сохранения правильной формы притир должен хорошо сопротивляться истиранию, обладать податливостью и необходимой твердостью; притир необходимо изготавливать из материала, имеющего большой диапазон твердости, с тем чтобы даже мягкие материалы можно было обрабатывать абразивами без их внедрения в деталь; независимо от материала притир должен сохранять свою плоскостность; не должен засаливаться, деформироваться или корродировать; его конструкция должна быть удобной для установки и закрепления на станке, легкой, но жесткой; иметь оптимальную шероховатость поверхности; простота изготовления и легкость правки; притир должен быть достаточно вязким, чтобы поглощать удары, амортизировать зерна, предотвращая повреждение обрабатываемой поверхности.

Кроме того, к рабочей поверхности притира предъявляются очень высокие требования по точности. Так, например, диски-притиры, применяемые для доводки плоских и цилиндрических поверхностей на плоскодоводочных станках, должны иметь неплоскостность рабочих поверхностей в пределах 0,1—1,0 мкм. Применение таких притиров обеспечивает точность доводки цилиндрических и плоских деталей с погрешностью геометрической формы 0,3—0,5 мкм.

Для получения столь высокой точности рабочие плоскости дисков притирают совместно. Совместная притирка (правка) дисков может производиться по методу трех плоскостей. Для этого в одном комплекте притирают не два, а три диска. Два диска после притирки ставят на станок для работы, а один является резервным и используется в работе после очередной притирки. Правят как вновь изготовленные притиры, так и бывшие в работе. Вновь изготовленные диски подвергают двум операциям притирки: предварительной и окончательной. Предварительная притирка выполняется непосредственно на станке, а окончательная — на специальном столе абразивным порошком той же зернистости, что и при доводке деталей. После правки при необходимости притиры шаржируются. Технология шаржирования аналогична технологии правки.

На качество правки и шаржирования большое влияние оказывает характер траектории относительного движения дисков-притиров. При правке и шаржировании одному из дисков придают движение, траектория которого описывается кривыми вида циклоид, эпициклоид, восьмерообразных кривых, кривых с большим радиусом, прямых линий и т. д.

Ю. Г. Проскуряков и И. С. Рыжов считают, что для правки и шаржирования требуются различные траектории движения [55]. Лучшим ти-

пом траектории при шаржировании является синусоидальная кривая. Такая траектория обеспечивает резкое изменение направления движения. При этом зерна абразива, получая касательное усилие, изменяющееся по направлению, как бы раскачиваются в разные стороны, разделявая углубления, в которые они начали шаржироваться, что способствует быстрому шаржированию их в поверхность притира. При этом уменьшается возможность перекатывания уже шаржированных зерен, а также степень их износа и разрушения.

Для получения высоких классов шероховатости и точности рабочих поверхностей притиров при их правке рекомендуется сочетание двух движений: вращательного и синусоидального. При сложении этих движений достигается сложная траектория, которая отличается длиной волны в каждый момент времени для различных участков правящегося притира.

Некоторые станки для правки и шаржирования плоских дисков-притиров не отвечают этим требованиям. Так, станок для правки и шаржирования притиров [56] имеет в качестве траектории плоскопараллельного движения восьмеркообразную кривую с большим радиусом [55]. Кривая образуется сложением двух взаимно перпендикулярных движений (качательного и поступательного) в плоскости притирочного диска. Каждое из движений производится от эксцентриков, вращающихся с разными скоростями, при этом векторы скорости этих движений не меняют резко своего направления. Поэтому значительная часть абразивных зерен перекатывается по поверхности притира. Такие зерна недостаточно эффективно шаржируются в притир.

Для качественного шаржирования парных притиров структура, твердость, состояние границ зерен основной металлической массы, форма и количество графита, а также другие их физико-механические свойства должны быть идентичными. Особое внимание при изготовлении притиров следует обращать на технологическую наследственность от первых операций до последних. Качество рабочих поверхностей притиров зависит не только от методов и условий выполнения последних операций механической обработки, оно формируется постепенно, начиная от получения заготовки и кончая отделочной обработкой. Поэтому при производстве притиров должно уделяться внимание не только химическому составу, но и условиям плавки чугуна, отливки его в форму и т. д. Иначе из отливок одной плавки практически довольно трудно подобрать притиры с одинаковыми свойствами. При этом важно, чтобы такие свойства притиров, как способность удерживать абразивные материалы, воспринимать шаржирование абразива, давать отделку определенной шероховатости, свойство «подрабатываемости» и другие специфические особенности шаржированных поверхностей, были одинаковыми для обоих притиров. В противном случае достичь качественной правки, шаржирования и требуемой стойкости невозможно. При этом необходимо, чтобы при окончательной доводке кинематика применяемого станка обеспечивала неповторяемость следа доводочных движений. Качество правки дисков-притиров контролируют обычно по наличию равномерных перекрещивающихся рисок (сетки) по всей плоскости и отсутствию отдельных пятен на плоскости диска.

Рабочая поверхность плоского притира может быть гладкой (рис. 1, а) или с различными канавками (рис. 1, б—р). Канавки на поверхности притира являются резервуарчиками, в которых удерживается доводочная паста и скапливаются отходы. При использовании суспензий канавки выполняют роль «артерий», по которым транспортируется абразивная среда и уносится отработанный шлам. Форма канавок, их число и расположение оказывают существенное влияние на распределение абразивных зерен по рабочей поверхности доводочного диска. Опыты,

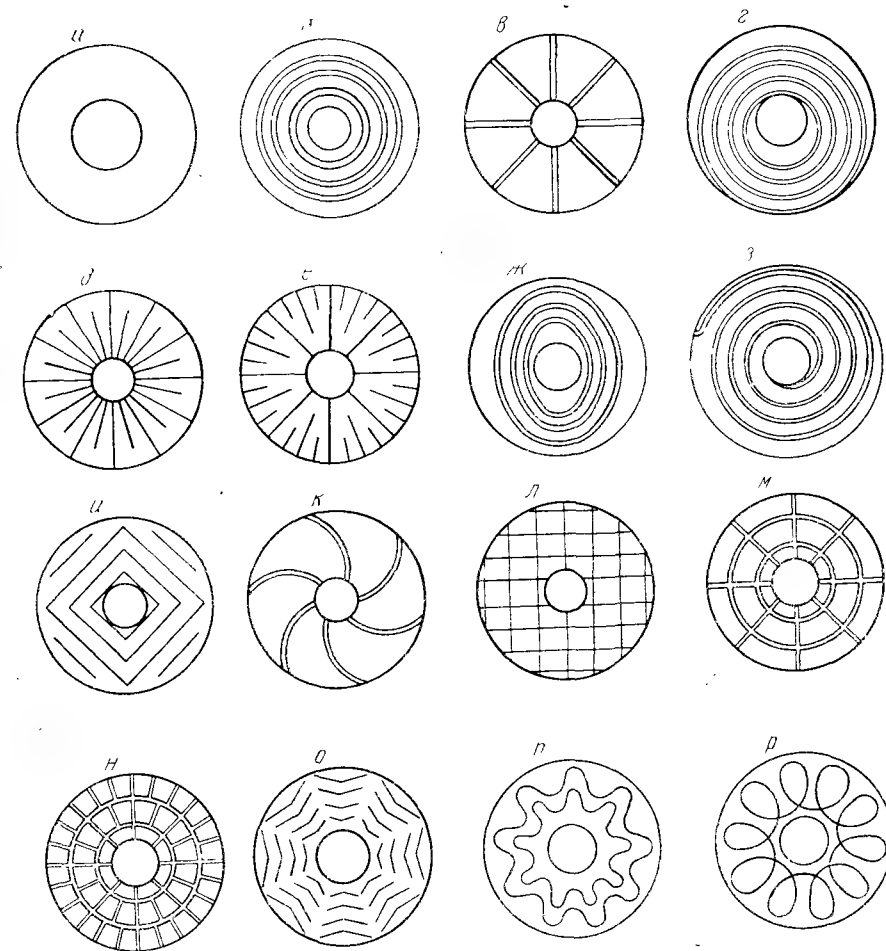


Рис. 1. Профили канавок на рабочей поверхности плоских притиров: а — гладкий; б — кольцевые концентрические; в — радиальные; г — кольцевые эксцентричные; д — первое сочетание радиальных полных и неполных; е — второе сочетание радиальных полных и неполных; ж — овалы (эллипсы); з — по спирали Архимеда; и — в виде квадрата; к — по логарифмической спирали; л — шахматное; м — первое сочетание кольцевых концентрических и радиальных; н — второе сочетание кольцевых концентрических; о — елочка; п — в виде синусоид; р — в виде циклоиды

проведенные нами на доводочных дисках с различными канавками, показали, что для паст лучшие результаты дают диски с канавками, выполненными по спирали Архимеда (рис. 1, *з*), для суспензий — диски с канавками, показанными на рис. 1, *н, д, г*. Испытания проводились на станке типа С.221.00. Станок вертикального типа и имеет только одно вращение вокруг вертикальной оси. Поэтому полученные данные без дополнительных исследований нельзя распространить на доводочные станки, которые имеют более сложную кинематику движений и обеспечивают дискам другие условия доводки.

Форма, параметры и расположение канавок на поверхности притира или доводочного диска определяются размерами и конфигурацией обрабатываемых деталей и самого диска, вязкостью применяемой пасты или суспензии, кинематикой движений диска и деталей, способом удаления стработанной смеси и т. д. Глубина и ширина канавок принимаются в пределах 0,5—8 мм, а иногда и выше, шаг спирали или кольцевых канавок — от 1 до 20 мм и более.

Наиболее часто плоские доводочные диски изготавливают из чугуна. Кроме чугуна, применяют сталь, медь, бронзу, свинец, стекло, керамику, текстолит, гетинакс, дюралюминий и другие материалы. Выбор материала притира зависит от снимаемого припуска, характера операции и абразивного материала. Как правило, в настоящее время для съема больших припусков применяют крупный абразив, которым шаржируются мягкие притиры; для абразива мелкой зернистости используют более твердые притиры.

Для доводки материалов с однородной твердостью и структурой тонкими микропорошками могут быть использованы высокотвердые притиры, твердость которых близка или равна твердости обрабатываемой детали или даже выше ее. Успешная попытка использовать такие притиры была сделана в работе [59].

С появлением высокопрочных алмазов и других сверхтвердых материалов диапазон применения высокотвердых притиров может быть существенно расширен. В этом случае, по-видимому, перспективно применение «силовой» доводки с использованием высокотвердых закаленных притиров, изготовленных из легированных сталей и сплавов, и повышенных удельных давлений. По-видимому, такие притиры можно использовать не только для тонких микропорошков, но и для более крупных зернистостей. Эффективность использования притиров, изготовленных из различных материалов, рассмотрена ниже (см. гл. IV).

Высокотвердые стальные притиры имеют ограниченное применение. Большой универсальностью отличаются чугунные притиры. Хорошую шаржируемость и повышенную стойкость дисков-притиров имеет чугун перлитно-ферритной структуры следующего химического состава: 3—3,5% С; 1—2 Si; 0,5—0,8 Mn; не более 0,15 S и 0,4% P. Оптимальной считается мелкозернистая структура. Для получения мелкозернистой структуры чугунные диски подвергают отжигу при нагреве до 800—810 °С (1073—1083 °К) с выдержкой их при этой температуре в течение 3 час. Затем они охлаждаются до 660 °С (933 °К); темп охлаждения 30 град/час. От 660 °С (933 °К) диски охлаждаются вместе с печью. Однородная мел-

козернистая структура позволяет избежать локальных участков с резко отличающейся твердостью. Для стабильной работы дисков необходимо, чтобы колебание твердости на отдельных участках диска, а также между двумя дисками одного комплекта не превышало *HV* 6—8.

В выборе оптимальной твердости чугунных притиров в литературе имеются разные точки зрения. Так, Г. М. Ипполитов [26] рекомендует применять притиры твердостью *HV* 180—220, З. И. Кремень и А. И. Павлючук [57] — *HV* 150—200, В. В. Масловский [34] — *HV* 100—200. В. Г. Улегин и А. П. Огородников [65] считают, что при использовании алмазных порошков твердость чугунных доводочных дисков должна быть значительно больше приведенных выше значений. С целью обеспечения наилучшего качества шаржирования доводочных дисков-притиров авторы предлагают не просто увеличить их твердость, а наряду с повышением твердости правильно подбирать структуру чугуна этих дисков.

Алмазные зерна хорошо внедряются в графит шаржируемого диска, если размеры графитовых включений соответствуют зернистости микропорошка. Структура чугуна должна подбираться такой, чтобы размеры графитовых включений обеспечивали наилучшее качество шаржирования доводочного диска. При этом важно не только соблюдать соответствие размерных параметров абразивного порошка и графитовых включений, но и правильно выбирать графитовые включения по форме. Такому выбору способствуют рациональный способ получения дисков и их термообработка.

Термообработка чугунных дисков определяет характер графитовых включений и их размер, существенно влияющих на производительность доводки и стойкость дисков. Недостаточная насыщенность рабочей поверхности диска графитовыми лунками, значительный разброс их размеров приводят к снижению производительности доводки и резкому уменьшению стойкости дисков между двумя переточками. Авторы [65] считают, что при использовании алмазных микропорошков средний статистический размер диаметра (шаровидных) или ширины (пластинчатых) графитовых включений должен находиться в диапазоне предельных размеров зернистости порошка, а среднее квадратичное отклонение ширины графитовых включений для шлифования — в диапазоне 4—7 мкм, для доводки — 1,5—4 мкм.

Кроме чугунных, в некоторых случаях хорошие результаты дает применение притиров, полученных методом порошкового спекания различных материалов. Так, фирма «Энджис» (Англия) предложила изготавливать притиры методом порошковой металлургии из смол и порошкообразных металлов. Такой материал получил название «химический металл» или «химет» [58]. В качестве порошкообразных материалов могут использоваться железо, медь, олово, свинец, никель, нержавеющая сталь, карбид вольфрама, керамика и другие соединения.

Свойства некоторых химетов приведены в табл. 25.

Из таблицы видно, что твердость химетов значительно ниже самих металлов. Такие притиры применяются для притирки и полирования уплотнительных прокладок, седел клапанов и других деталей, изготовленных из стали, фосфористой бронзы, бессвинцовой бронзы, свинцо-

во-никелевых сплавов, огнеупорных материалов, ферритов, полупроводников, лазерных стержней и т. д.

Химет меди использовался при доводке медицинских ножей, доводке и полировании натриевого стекла. По данным зарубежных фирм, применение алмазной пасты зернистостью 6 мкм позволило получить неплоскостность в пределах двух интерференционных линий, а дополнительное полирование пастой зернистостью 1 мкм приводило к снижению неплоскостности до одной интерференционной линии.

Таблица 25

Физико-химические характеристики химических металлов (в английской системе единиц)

Металл	Твердость	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/град	Модуль упругости $\beta \cdot 10^5$	Плотность
Железо	190	1,04	120,0	7,8
Химет железа	30	4,70	9,7	6,0
Медь	86	1,66	100,0	8,9
Химет меди	27	5,20	8,1	6,8
Олово	20	2,30	40,0	5,8
Химет олова	17	4,30	8,3	4,9
Свинец	24	—	—	11,3
Химет свинца	13	—	—	10,2

Многие разновидности химетов используются для доводки атомных топливных стержней, состоящих из смеси двуокиси урана, покрытой пиролитическим углеродом и карбидом кремния. Чаще всего для этого применяют химет железа. Обнадеживающими являются и результаты применения химетов при доводке слоистых материалов с различной твердостью. Например, при доводке керамических материалов, на которые нанесены печатные схемы, хорошие результаты показали материалы типа химет керамики.

Как и для плоских притиров, высокие требования предъявляются к изготовлению притиров стержней, пробок и втулок, предназначенных для доводки отверстий. Классической формой притира для обработки отверстий является гладкая разрезанная вдоль оси втулка, имеющая внутреннее центральное отверстие в виде конуса (рис. 2, а). Конусность внутренней поверхности принимается обычно равной 1:50 или 1:30 (1:20). Такая поверхность обеспечивает хорошее удержание притира на оправке.

В процессе доводки притир перемещается по оправке, постепенно разжимаясь и компенсируя изношенный слой. Поэтому такие притиры в технике получили название разжимных. К рабочей (цилиндрической) и конической поверхностям разжимного притира предъявляются высокие требования как по точности геометрической формы, так и по их взаим-

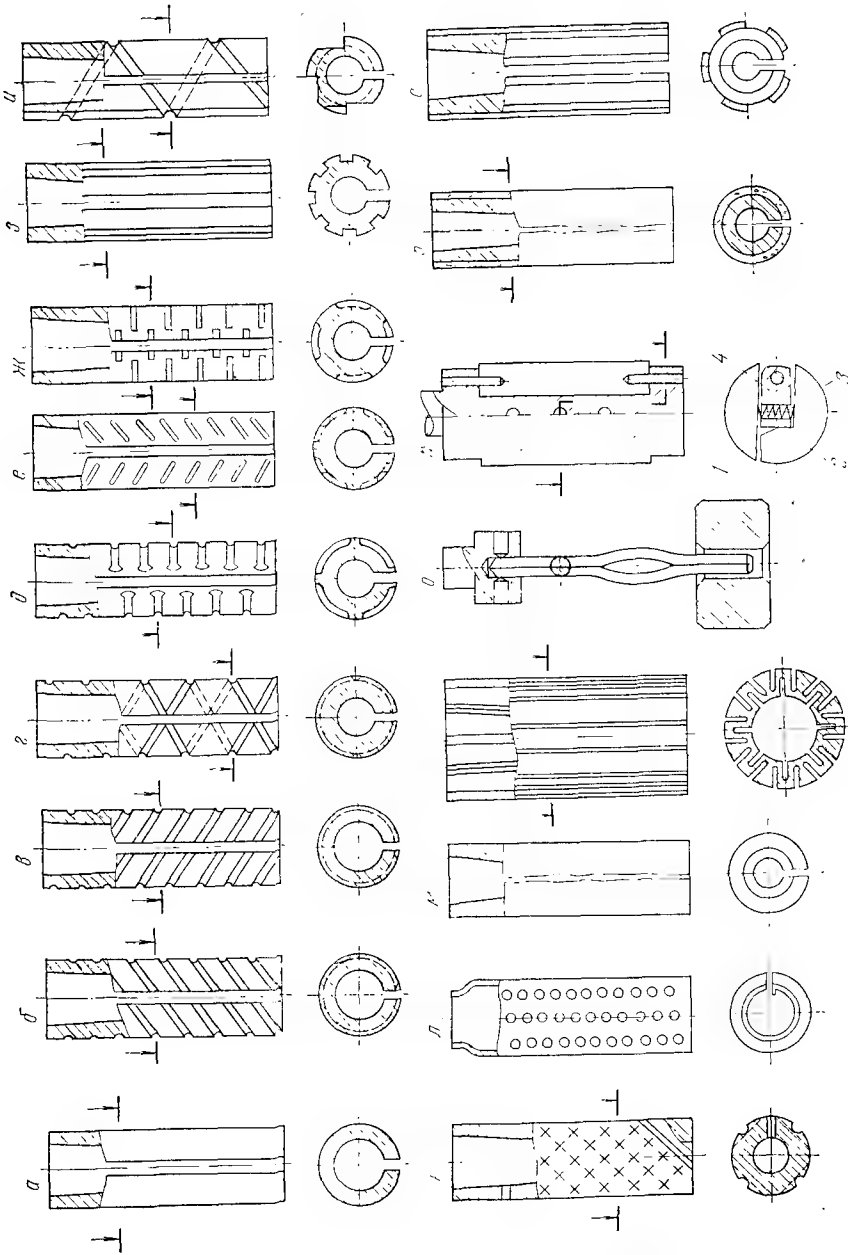


Рис. 2. Притиры для доводки цилиндрических отверстий и профили канавок на них

ному расположению. Биение притира на оправке, применяемого для доводки точных отверстий, не должно превышать 0,01—0,02 мм, а отклонения от точности геометрической формы (нецилиндричность) — не более 0,005—0,01 мм. Особенно жесткие требования предъявляются к точности совпадения углов конуса притира и конической оправки, а также к искривлению их осей. Совпадение углов обеспечивает равномерный разжим притира при перемещении его по оправке, а отсутствие искривления осей не дает дополнительного искажения цилиндрической поверхности притира. Известно, что притир имеет свойство прирабатываться и исправлять свою геометрическую форму в процессе доводки. Однако при значительном искривлении отверстий изменение цилиндрической формы его сказывается на точности доводимого отверстия.

Наружная рабочая поверхность разжимного притира может быть не только гладкой, но и с различными канавками. Известны следующие разновидности канавок: а) винтовые левые (рис. 2, б); б) винтовые правые (рис. 2, в); в) двойные винтовые (рис. 2, г); г) эксцентриковые (рис. 2, д); д) типа «елочка» (рис. 2, е); е) типа «шахматка» (рис. 2, ж); ж) продольные (рис. 2, з, и); з) сочетание продольных и винтовых (рис. 2, и). Кроме профиля, канавка определяется шириной и глубиной. Расположение канавок на поверхности характеризуется числом канавок, приходящихся на единицу площади. У винтовых канавок устанавливают и шаг.

Кроме канавок, рассмотренные конструкции притиров имеют продольный разрез стенки (за исключением притира, показанного на рис. 2, и). Получение продольного разреза — простая, но продолжительная операция. Нами предложено получать паз методом разрыва стенки притира. Образующаяся при разрыве стенки сквозная трещина выполняет роль паза. Притир с трещиновидным пазом показан на рис. 2, м. Технология производства таких притиров описана в параграфе 2 данной главы.

Известны также и другие типы канавок, например притир [60] с крестообразными углублениями на рабочей поверхности и спиральным продольным разрезом (рис. 2, к). На заводе «Моторпал» (ЧССР) для доводки отверстий диаметром 6—10 мм используют притиры, изготовленные из тонкой листовой жести (рис. 2, л). Притир представляет собой цилиндрическую трубку с большим количеством отверстий, которые служат для удержания доводочной пасты и являются своего рода канавками. А. Н. Акинфиев, С. А. Мезенцев, И. Х. Бурда и др. [61] предложили притир без продольного разреза (рис. 2, н). Он выполнен в виде гофрированного тела, гофры которого образованы несквозными, расположенными в шахматном порядке радиальными прорезями, выполненными на наружной и внутренней поверхностях. В работе [62] описан сборный упругий притир для доводки глубоких отверстий малых диаметров (рис. 2, о). Упругие лепестки притира изготавливались из предварительно нагретой стальной пружинной проволоки или из бериллиевой бронзы. Применение таких притиров целесообразно для доводки отверстий диаметром 1—5 мм, к которым не предъявляются высокие требования по точности. Недостатком такого притира является то, что он не исправляет погрешностей предыдущей обработки.

Для доводки отверстий диаметром 15—500 мм на предприятии ТОО (ЧССР) предложен [63] разъемный подпружиненный притир, показанный на рис. 2, п. Абразивные сегменты 1 и 2, закрепленные на поводковой оправке 4, отталкиваются друг от друга пружинами 3. Поворачиваясь на двух парах штифтов, сегменты отходят друг от друга. Разжим сегментов происходит постоянно, благодаря этому в процессе работы автоматически компенсируется износ притира. Получили широкое распространение притиры с покрытиями (рис. 2, р, с). Их особенности рассмотрены ниже (см. гл. VII).

Таблица 26

Сравнительная таблица доводки отверстий притирами различной конструкции [64]

Притир	Достигаемый класс шероховатости	Конусность отверстий	Съем металла
		мм	
Имеющий форму гладкого цилиндра	11б	8—9	12
Со спиральными канавками по всей длине	10а	6—8	20
С перекрещивающимися спиральными канавками, которые плавно сходят на половине его длины	11а	1—3	18

Работоспособность притиров с различными канавками не одинакова. Эффективность использования некоторых притиров с различными канавками приведена в табл. 26. Исследования проводились на стали 20Х, цементированной на глубину 0,8—1,2 мм, и стали ШХ15. Обе стали закалывались до HRC 58—62. Исходная шероховатость образцов 7—8-й классы. Опыты проводились на модернизированном вертикально-доводочном станке мод. 3820Д. Режим доводки: давление $P=1 \text{ кг/см}^2$ (98,1 кН/м²); скорость резания 20 м/мин; продолжительность процесса 5 мин; материал притира чугун СЧ 18-36, HB 170—220.

Анализ данных таблицы показывает, что лучшие результаты по производительности дают притиры со спиральными канавками, нанесенными по всей поверхности притира, однако шероховатость поверхности и конусность отверстия в этом случае хуже. По параметрам качества обработанного отверстия лучшие результаты получены при использовании притиров с перекрещивающимися канавками, нанесенными только на половине длины. Для исследованных условий установлены оптимальные значения радиуса канавок. Испытывались канавки радиусом от 0,5 до 4 мм. Установлено оптимальное значение радиуса при доводке электрокорундом М14 1,25—1,75 мм. С повышением зернистости абразива до М28 оптимальное значение радиуса канавки увеличивается до 1,75—2,15 мм.

В наших экспериментах также исследовалось влияние геометрических параметров канавок. Были изготовлены различные притиры с односторонними и перекрещивающимися канавками. В качестве переменных

параметров были использованы шаг канавок S и их число m . Шаг канавок изменялся от 6 до 18 мм, а число — от 1 до 6 (рис. 3). Опыты проводились на специально разработанной установке (см. параграф 3 гл. III) с использованием чугунных притиров длиной 18 мм. Доводились отверстия длиной 20 мм в закаленной стали 18Х2Н4ВА. Режимы и условия до-

водки описаны ниже (см. гл. VI). Установлено, что наиболее производителен притир с перекрещивающимися канавками. Оптимальное значение шага канавок 18 мм, число канавок 2—3.

Для повышения точности вновь изготовленные притиры, а также изношенные подвергаются правке. Для этого используют контрпритиры (вспомогательные притиры, предназначенные для правки основных). Точность изготовления контрпритира должна быть не ниже точности изготовления притира.

Притир с обрабатываемой поверхностью может контактировать в одной точке, по линии или по поверхности. Схемы таких контактов представлены на рис. 4. Притиры, контактирующие с обрабатываемой поверхностью в точке, не исправляют погрешностей предыдущей обработки, а контактирующие по линии дают

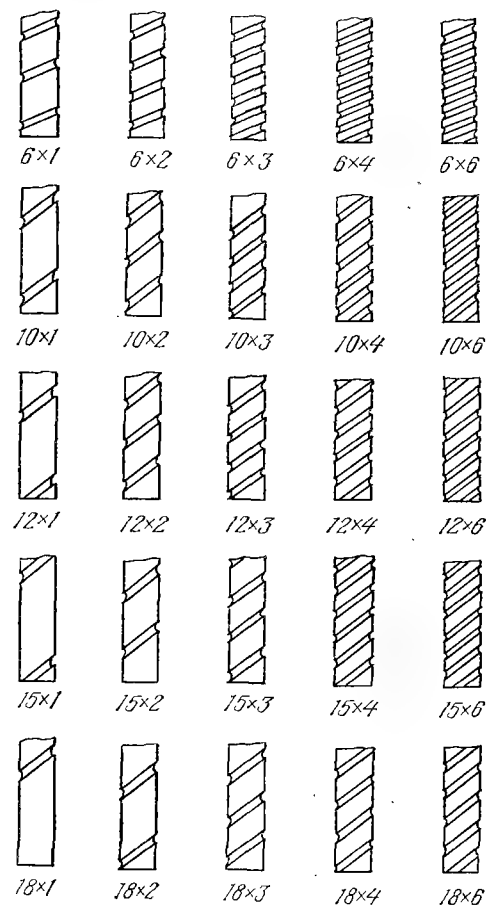


Рис. 3. Изменение шага и числа канавок на исследуемом притире

более высокую точность обработки. Если же контакт притира с обрабатываемым изделием происходит по поверхности, то можно достигнуть высокой точности обработки, однако стойкость их невысокая.

В качестве материала для разжимных притиров и контрпритиров часто применяются серый чугун и сталь (Ст. 3, А12). Возможно использование для этих целей и высокопрочного чугуна. Высокопрочный вязкий магниевый чугун с шаровидным графитом, обладающий хорошими антифрикционными свойствами, назван лучшим материалом для притиров [75].

Конструкция притира для доводки конических отверстий определяется в первую очередь способом и точностью обработки. Притир для доводки конусных поверхностей на доводочной бабке представляет собой чугунный цилиндрический стержень с конусной поверхностью на конце. Для прецизионных деталей, в которых конусная поверхность следует за цилиндрической, как например в корпусе распылителя, устанавливаются жесткие требования на несоосность осей конуса и направляющего отверстия. Для обеспечения отклонений по несоосности зазор между поверхностью направляющего отверстия и наружной цилиндрической поверхностью притира должен быть выдержан в пределах 1—2 мкм. Это требует обработки и сортировки притиров с высокой точностью, что достигается путем доводки их на плоскодоводочных станках. Стойкость притиров при доводке конусных отверстий на доводочной бабке низка. Так как контакт притира с обрабатываемой поверхностью осуществляется по всей площади, то это способствует высокой интенсивности изнашивания притира и появлению значительной выработки. Притир перешлифовывают обычно после доводки одной детали. Иногда для одной детали используют два притира.

На рис. 5 представлена конструкция притира [66] для доводки конических отверстий на специальных станках, кинематика которых позволяет сочетать линейный и объемный контакты притира и обрабатываемой детали. При линейном контакте происходят исправление формы обраба-

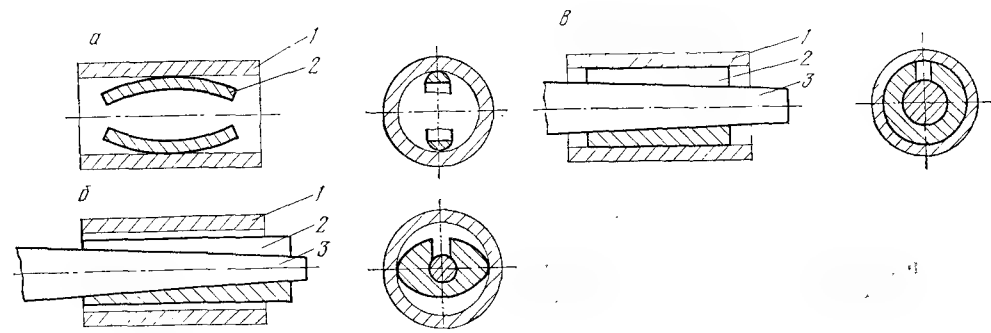


Рис. 4. Схемы контактов разжимных притиров с обрабатываемой поверхностью (по В. Н. Морозенко): а — в точке; б — по линии; в — по поверхности; 1 — деталь; 2 — притир; 3 — разжимный конус или игла

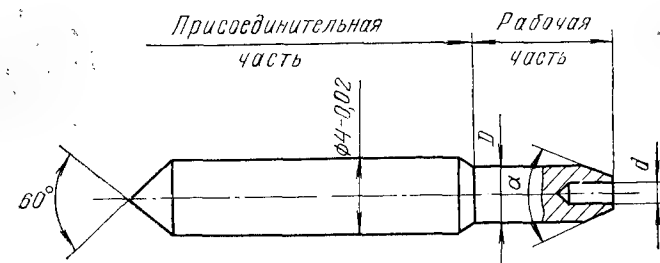
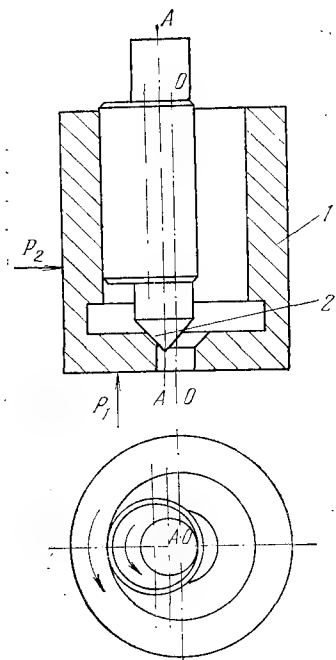


Рис. 5. Притир для доводки малых конических отверстий с углом

тываемой поверхности в продольном сечении и автоматическая правка притира, при объемном — исправление формы обрабатываемого конуса в поперечном сечении. Результаты доводки в этом случае во многом зависят от правильного выбора параметров D и d . При доводке запорного конуса в корпусе распылителя наружный диаметр притира обычно принимают несколько меньшим, чем больший диаметр обрабатываемого конуса, но больше максимального диаметра конуса иглы, работающей в



паре с корпусом. Это обеспечивает возможность правки рабочей поверхности притира в процессе доводки. Диаметр центрального отверстия притира d принимают равным меньшему диаметру запорного конуса в корпусе распылителя. Такие притиры обычно изготавливают из углеродистой инструментальной стали, их твердость $HRC\ 35-40$.

На рис. 6 представлена разработанная в ЦНИИТМАШ конструкция притира для доводки конических поверхностей с эксцентрично расположенными базирющей и рабочей поверхностями [67]. В процессе обработки деталь 1 вращается вокруг собственной оси $O-O$, а притир 2 — вокруг оси симметрии рабочего конуса $A-A$, прижимаясь к обрабатываемой детали в осевом и радиальном направлениях с усилиями соответственно P_1 и P_2 . Усилия обеспечивают

Рис. 6. Конструкция притира для доводки конических отверстий с эксцентриковой опорной поверхностью

плотное прилегание базовых поверхностей и перемещение вдоль образующей конической поверхности притира. Такой способ притирки повышает качество обработки конических поверхностей. Интересные исследования по доводке внутренних конических поверхностей проводятся в Рижском политехническом институте.

Для доводки пирамидальных отверстий с малым углом наклона грани α может быть применен притир, показанный на рис. 7 [68]. Он состоит из оправки 2, болта 1, сегментов 3 и резиновой трубки 4. Количество сегментов равно числу граней в отверстии. Трубка служит для обеспечения упругого контакта сегментов с обрабатываемой поверхностью. Кольцо 5 охватывает концы сегментов притира слева, другие концы справа входят в хвостовик оправки. Между сегментами имеются продольные пазы, расположенные под углом β к оси притира. Регулирование размеров производится сжатием резиновой трубки при ввинчивании болта в оправку.

В отличие от доводки плоскостей, цилиндрических или конических поверхностей доводка сферических поверхностей типа шариков хотя и ме-

нее универсальна, но более сложна. Трудности обработки шаровых поверхностей связаны с тем, что такие поверхности не имеют установочных баз и обработка их производится не поштучно, а партиями.

Для доводки сферических поверхностей типа шариков используются специальные доводочные диски. Качество доводки шариков существенно зависит от конструкции и стойкости доводочных дисков. В настоящее время на подшипниковых заводах основным способом доводки высокоточных шариков является обработка их в кольцевых канавках между верхним неподвижным прижимным диском и нижним вращающимся. Кольцевые канавки могут быть расположены в нижнем (рис. 8, а, в, е), верхнем (рис. 8, г, д) или в обоих (рис. 8, б, з) дисках, а их профиль в поперечном сечении может быть округлым (рис. 8, а, б) или угловатым (рис. 8, в—з), симметричным (рис. 8, а—г, ж, з) или несимметричным (рис. 8, д, е). При несимметричном профиле вершина канавки может рас-

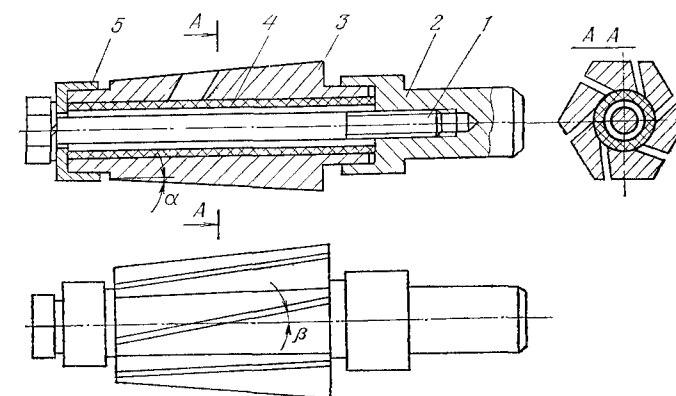


Рис. 7. Притир для доводки конических пирамидальных отверстий

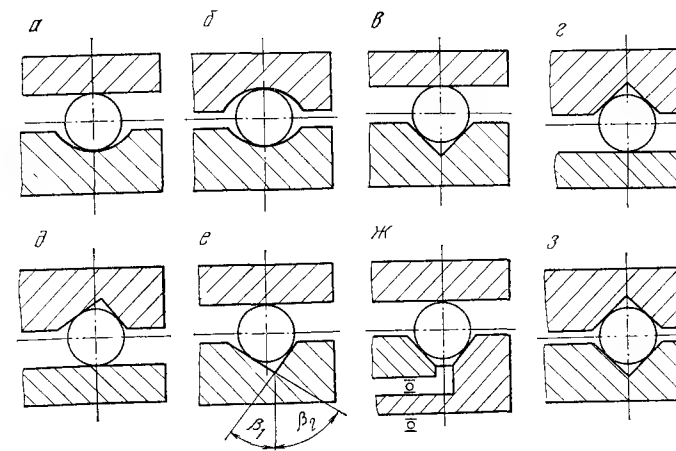


Рис. 8. Расположение и основные профили канавок на дисках для доводки шариков

полагаться слева или справа от вертикальной оси. Количество канавок на поверхности диска определяется диаметром его рабочей поверхности, типом станка, степенью точности и размерами обрабатываемых шариков. Чем больше размер шариков и выше степень точности, тем меньше канавок наносится на рабочую поверхность диска. Глубина канавки зависит от ее профиля и способа доводки. Она может приниматься в довольно широких пределах — от $1/4$ до $3/4$ диаметра доводимого шарика. Для кольцевых канавок, нарезаемых только в одном диске, чаще всего эта глубина составляет $1/3$ диаметра шарика.

Канавки могут наноситься на диски концентрично, эксцентрично или с другим расположением. При концентричном расположении с точки зрения получения более точной геометрии по овальности и гранности доведенных шариков канавки большего диаметра предпочтительнее. Это объясняется тем, что окружная скорость диска повышается с увеличением расстояния от оси вращения. Следовательно, на периферийных канавках шарики вращаются быстрее, что повышает их точность по сравнению с шариками, катящимися по канавкам, расположенным ближе к оси вращения. Уменьшению разноразмерности шариков способствует применение элеватора, так как он позволяет осуществлять перемешивание шариков с различных канавок и направляет их повторно на другие. Если же элеватор отсутствует, то с каждой кольцевой канавки получают шарики с характерным для нее размером и геометрическими параметрами.

Контакт шарика с доводочными дисками может быть двухточечным (рис. 8, а, б), трехточечным (рис. 8, в—ж) или четырехточечным (рис. 8, з). Трехточечный контакт бывает с одной или с двумя ведущими точками. Так, например, если (рис. 8, в) вращается только нижний диск, а верхний неподвижен, то имеем две ведущие точки, находящиеся в местах контакта шарика с нижним диском; если вращается только верхний диск, а нижний неподвижен, то получаем контакт с одной ведущей точкой, находящейся в месте контакта шарика с верхним диском.

Опыт работы шарикоподшипниковых заводов показывает, что круглые канавки, дающие двухточечный контакт, не гарантируют требуемого качества доводки. В этом случае шарики всегда имеют значительную овальность и гранность. Лучшие результаты обеспечивают угловые канавки. Если угловые канавки нарезаются в нижнем сплошном диске, то хорошие результаты дает несимметричный профиль с углами $\beta_1 = 35^\circ$ ($0,6125 \text{ рад}$) и $\beta_2 = 55^\circ$ ($0,9625 \text{ рад}$) [69]. В этом случае можно достичь увеличения стойкости притиров на 10—15% [70].

При доводке шариков, особенно при двухточечном и четырехточечном контактах, стремятся достичь наибольшей соосности верхнего и нижнего дисков. Однако опыт показывает, что принудительными методами центрирования нужную степень соосности дисков обеспечить нельзя [71]. Лучшие результаты достигаются, если один диск центрируется, а второй остается «плавающим», способным самоустанавливаться.

В Японии получили широкое распространение станки фирмы «NSK» с принудительно смещенными осями O и O_1 (рис. 9) доводочных дисков, которые в этом случае изготавливаются разного диаметра [72]. Нижний

диск является ведущим, в нем профилируют кольцевые канавки. Обработке подвергается часть шариков, находящаяся в зоне контакта.

В ГДР предложен [73] способ обработки шариков (рис. 10) в угловой канавке, поверхности которой образованы фасками двух колец (1 и 2). Эти кольца закреплены на разных шпинделях и вращаются в разные стороны. Верхний неподвижный диск обеспечивает необходимое давление P на шарики. Эта схема доводки в нашей стране была усовершенствована А. Н. Садовниковым и С. М. Андиевым [74]. Авторы, оставив

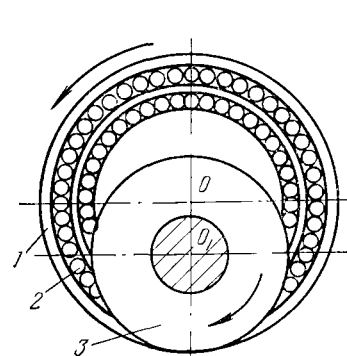


Рис. 9. Схема доводки шариков с помощью двух дисков со смещенными осями вращения: 1 — нижний ведущий диск; 2 — шарики; 3 — верхний прижимный диск

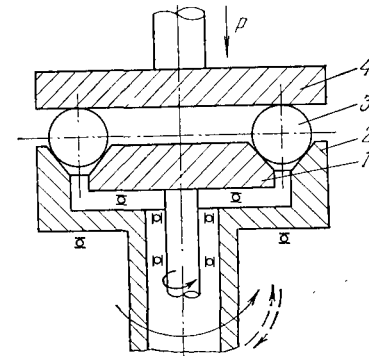


Рис. 10. Схема доводки шариков в канавке, образованной фасками двух колец: 1, 2 — кольца; 3 — шарики; 4 — прижимный диск

ту же конструкцию доводочных дисков, предложили новый способ доводки. Они изменили направление вращения дисков со встречного на попутное и ввели переменную (осциллирующую) угловую скорость (на рис. 10 эта скорость показана пунктиром). Один из дисков имеет неравномерное вращение с периодом, согласованным с диаметром шариков, размером канавки и углом ее профиля. Наличие у одной из сторон неравномерного профиля позволяет непрерывно поворачивать шарик в зоне обработки вокруг вертикальной оси, в то время как совместное вращение доводочных колец позволяет вращать его вокруг горизонтальной оси.

С. Г. Редько и К. М. Сивяковым [76, 77] предложен способ доводки шариков между двумя доводочными дисками в кольцевых канавках с переменными углами контактирования (рис. 11). Закономерное осциллирующее качение шарикам в зоне обработки задается инструментом через опорные точки контакта A и A_1 , B и B_1 . Угол θ наклона мгновенной оси вращения шарика к оси OO вращения доводочного диска изменяется непрерывно и периодически. Такое изменение происходит вследствие того, что на направляющей канавке протачивается паз в виде синусоиды, наложенный на окружность канавки. Данный метод обеспечивает более высокую точность доводки шариков. Однако и в этом случае шарикам, находящимся в канавках, расположенных на различном расстоянии от

центра диска, не обеспечиваются одинаковые условия доводки, что приводит к некоторому разбросу размеров в обрабатываемой партии.

Исследованиями В. М. Климовича, проведенными под руководством П. И. Ящерицына, было доказано, что рассмотренные выше конструкции доводочных дисков и способы доводки хотя и позволяют повысить точность и производительность обработки, однако не обеспечивают повышенной производительности и резкого улучшения качества выпускаемой продукции. Главной причиной является то, что существующие конструкции

дисков и способы доводки за время однократного контактирования шарика с дисками не обеспечивают гарантированного вращения шарика вокруг трех его взаимно перпендикулярных осей на угол не менее 2π [78]. Для устранения этого недостатка

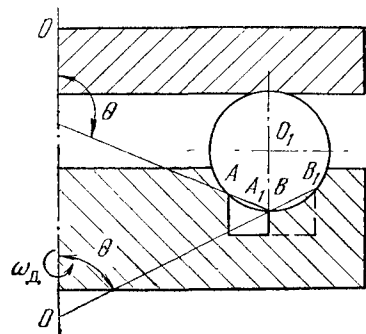


Рис. 11. Схема доводки шариков в кольцевых канавках с переменными углами контакта

предложены новые методы обработки шариков в эллипсных канавках и в канавках, расположенных по логарифмическим спиральям. Кроме того, разработана конструкция устройства для элеваторной обработки шариков в желобах, расположенных по логарифмическим спиральям. Эти методы позволяют существенно повысить точностные параметры шариков и в несколько раз производительность процесса доводки.

Материалом для шариковых доводочных дисков чаще всего служит чугун, выплавляемый в индукционных или в дуговых печах. Чугунные доводочные диски должны быть без раковин, пористостей и других дефектов, иметь однородную структуру в виде мелкопластинчатого перлита. Графит должен быть в виде мелких, равномерно распределенных включений. Чаще всего диски имеют твердость $HB\ 180—220$. Иногда доводочные диски по твердости выбираются по формуле

$$HB = 220 - 1,5 d, \quad (3)$$

где d — диаметр шариков, мм. В соответствии с этой зависимостью для доводки мелких шариков применяют диски большей твердости.

Кроме чугуна, для доводки шариков, особенно изготавливаемых из неметаллических материалов (ситаллов, фторопласта, стекловолоконитов и т. д.), иногда применяются диски из текстолита и других материалов. Доводочные диски производятся в основном диаметром до 1000 мм и толщиной до 100 мм.

При обработке деталей с помощью невнедряющегося абразива применяются инструменты, которые носят название полировальников, полировальных кругов, лент. Различают два вида полирования: черновое (предварительное) и чистовое (окончательное). Кроме того, как отдельный вид полирования широкое распространение получила подготовка по-

верхности к гальваническим покрытиям, названная матированием. Обработку осуществляют поперек ранее полученных гребешков шероховатости, благодаря чему уменьшается шероховатость обрабатываемой поверхности и на матированной поверхности лучше удерживается гальваническое покрытие.

Наиболее распространен метод полирования деталей кругами. Полировальный круг — это мягкий эластичный инструмент, на котором закреплен слой абразивных зерен или нанесена полировальная паста. Материалы для полировальных кругов должны обладать достаточной прочностью и способностью хорошо удерживать на рабочей поверхности полировальную пасту, а также быть эластичными и сравнительно легкими. Полировальные круги изготавливаются из фетра, войлока, различных тканей, прессованной бумаги, резины, пластмассы, кожи и т. п. По сообщениям японской печати, при полировке монокристаллов кремния положительных результатов можно достичь при использовании полировальников, изготовленных на основе полиэфирных смол.

Фетровые и войлочные круги просты в изготовлении, но ввиду их высокой стоимости имеют ограниченное применение. Войлочные круги подразделяются на тонкошерстные, полугрубошерстные и грубошерстные. Чем качественнее требуется получить поверхность при полировании, тем тоньше должен быть ворс. Тонкошерстные круги применяются при обработке особо ответственных деталей машин и приборов. Полугрубошерстные круги используют при полировании хирургических инструментов, деталей точных измерительных приборов, требующих отделки высокого качества, зеркального и технического стекла. В остальных случаях применяют грубошерстные полировальные круги.

Широкое распространение получили текстильные (тканевые) круги. Их изготавливают из хлопчатобумажной, шерстяной или синтетической ткани путем склеивания и спрессовывания отдельных сшитых секций. Однако текстильные круги с абразивными порошками одной и той же зернистости, что и войлочные, дают шероховатость поверхности на один класс грубее.

Наиболее высококачественные текстильные круги изготавливают из киперной ткани, низкосортные текстильные полировальные круги — из всевозможных отходов тканей. Различают следующие типы кругов: дисковые (непрошитые), секционные и наборные (прошитые) и специальные. Непрошитые дисковые круги изготавливают из однородной ткани. Их склеивают из отдельных дисков, которые штампуют на прессе или вырезают вручную. Возможно изготовление дисковых кругов из квадратных кусков материи, при этом куски располагают так, чтобы углы материала были смещены относительно друг друга по окружности. Такая укладка экономит материал и позволяет увеличить стойкость круга. Клееные круги имеют повышенную жесткость, значительно меньшую — сшитые круги. Секционные круги изготавливают как из цельных матерчатых дисков, так и из отдельных кусков материи, уложенных между двумя цельными матерчатыми дисками. Диски, собранные в секции по 15—20 шт., прошивают на специальных швейных машинах. Виды прошивки разнообразны. Некоторые из них показаны на рис. 12.

Наиболее просты в изготовлении и широко применяются круги с концентрической, параллельной и спиральной прошивками (рис. 12, *а—в*). Особенно распространение получили круги со спиральной прошивкой. Спираль делается с постоянным шагом между строчками 10—40 мм [17]. Для лучшего удержания пасты рекомендуются усложненные формы прошивки (рис. 12, *г—и*). После прошивки секций в центре каждой из них пробивают отверстие и собирают круг, который затем обтачивают и при необходимости профилируют.

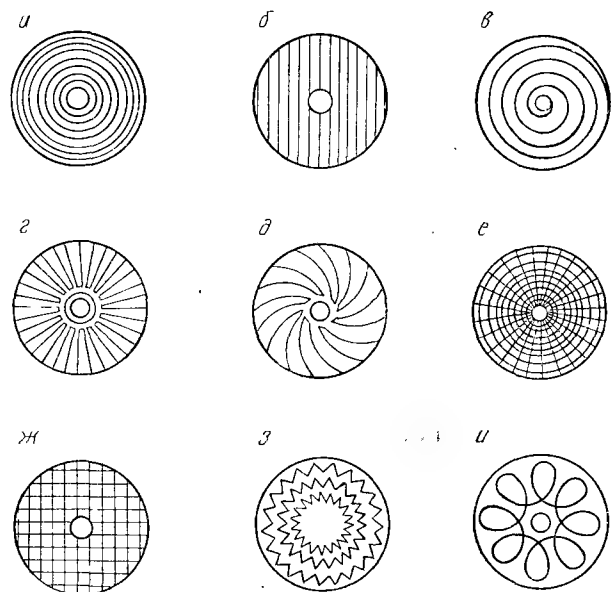


Рис. 12. Основные виды прошивок секционных полировальных кругов: *а* — концентрическая; *б* — параллельная; *в* — спиральная; *г* — радиальная; *д* — лопастная; *е* — комбинированная; *ж* — сетчатая; *з* — зигзагообразная концентрическая; *и* — в виде циклоиды

Кроме секционных, применяют и наборные матерчатые круги. Их изготавливают следующим образом. Из отходов или рулона ткани вырезают отдельные диски. Каждый диск ткани складывают вчетверо. Полученные сегменты вставляют один в другой до укомплектования полного круга. После прошивки, пробивки центрального отверстия и обточки на периферии круга получается характерное елочное строение (рис. 13, *а*). В складках, образованных сегментами, хорошо удерживается полирующая паста. При вращении в прямом и обратном направлениях такой круг дает различные результаты. Вращение в направлении сегментных стрелок характеризуется менее сильным полирующим эффектом, чем противоположное, поэтому первое направление вращения целесообразнее использовать для материалов с меньшей твердостью, а второе — для более твердых.

При изготовлении полировальных кругов возможны и другие методы укладки матерчатых дисков и полос. Например, широкое распростране-

ние получили круги (рис. 13, *б*), сложенные из полосы материала, свернутой в виде спирали (гофры). Такие круги хорошо удерживают полировальную пасту, вентилируются в процессе полирования и позволяют работать с повышенным давлением.

Бумажные круги изготавливаются из сшитых и спрессованных вместе листов гладкой или гофрированной бумаги. Большая жесткость бумажных кругов позволяет применять их только для получения шероховатости поверхности 6—7-го классов. Круги из гофрированной бумаги обла-

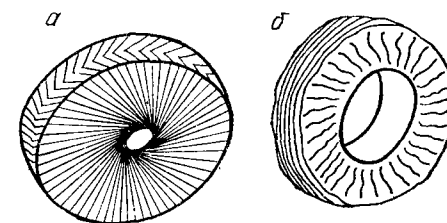


Рис. 13. Наборный сегментный (*а*) и гофрированный (*б*) матерчатые круги

дают большей эластичностью, чем из гладкой, и в силу этого обеспечивают менее шероховатую поверхность. Бумажные круги более стойки, чем текстильные, но тяжелее войлочных и текстильных.

Закрепление абразивных зерен на рабочей поверхности полировального круга осуществляется методом накатывания. Накатку производят в два приема: сначала на рабочую поверхность наносят слой клея, а затем на него — слой зерна. Накатка зерна производится в два-четыре слоя. Первый слой на войлочных и фетровых кругах накатывается с применением мездрового клея, а последующие слои — при помощи жидкого стекла. Для накатки первого слоя жидкое стекло не применяют, так как оно плохо соединяется с войлоком и фетром. На текстильные круги первый слой зерна может наноситься и жидким стеклом, так как в отличие от войлока ткань хорошо с ним сцепляется. На бумажных кругах абразивное зерно закрепляется при помощи силикатного клея. Накатанные круги сушат в естественных или в искусственных условиях после нанесения каждого слоя.

Широко используется метод накатывания на круг абразивной массы, состоящей из смешанных и «проверенных» вместе абразивных зерен и клея. Соотношение зерна и клея берется в зависимости от желаемой жесткости полировального круга. Для жестких кругов используют больше зерна, меньше клея (на 6—7 весовых частей зерна 3—4 клея), для эластичных — 3—4 части зерна на 6—7 клея. Для полирования сложных поверхностей (канавки сверл, метчиков) и декоративной обработки применяют гибкие (резиновые) круги, обладающие повышенной эластичностью. Такие круги изготавливает Челябинский электрометаллургический комбинат. Гибкие круги выпускают на вулканической связке, в составе которой уменьшено содержание серы и увеличено количество актипа. Эти круги изготавливаются четырех степеней эластичности. Эластичность проверяется на приборе Джонсона путем вдавливания шарика диаметром 1/8 дюйма под нагрузкой 1 кг (9,81 н). При глубине лунки 0,18—0,15 мм

эластичность круга соответствует высокой степени. Такой круг обозначается индексом 1 ГК. Остальные три степени эластичности (средняя (2 ГК), малая (3 ГК), жесткая (4 ГК)) должны иметь глубину лунки соответственно 0,15—0,12; 0,12—0,08 и 0,08—0,06 мм. Оптимальное давление для гибких кругов составляет 0,5—2 кГ/см² (49,05—196,2 кН/м²).

Размеры выпускаемых гибких кругов регламентированы ГОСТ 3647—59. Они выпускаются диаметром 70—500 мм, толщиной 6—75 мм, зернистостью 40—16.

Представляет интерес поиск новых искусственных материалов для полировальных кругов, не уступающих по качеству фетровым и войлочным кругам. Во ВНИИАШ исследованы рецептура и технология изготовления кругов на основе поропласта и ведутся работы по созданию новых видов полировальных кругов на основе поливинилового спирта и других синтетических материалов. Научно-исследовательский институт часовой промышленности разработал технологию получения полировальных кругов на основе пенопластов.

За рубежом (Франция, Япония, Америка и др.) получили широкое распространение полировальные круги из синтетических пластмасс и смол. В Японии, например, изготавливают полировальные круги из поливинилформала. В процессе изготовления к смеси из воды и раствора, состоящего из поливинилового спирта, воды и соляной кислоты, добавляют абразивное зерно, состав вспенивают с помощью поверхностно-активного пенообразователя. Затем в полученную смесь добавляют формалин и осуществляют реакцию ацеталирования [17]. Изготовленный таким способом круг обладает хорошими полирующими свойствами. Использование алмаза или эльбора в виде паст или свободного зерна при полировании вызывает повышенный удельный расход этих материалов. С целью снижения такого расхода во ВНИИАлмаз разработаны и исследуются алмазные полировальные круги и комплекс органических связок для них со связанным зерном. В качестве связующего вещества применяется смесь термореактивной (пульвербакелит) и термопластичной смол. Исследование изготовленных из этих материалов связок ВР-2, ВР-3, ВР-3А, ВР-3Б, ВР-3В, ВР-4 и др., проведенное на твердых сплавах с использованием зернистостей от АСМ 3/2 до АСМ 60/40, позволило получить обнадеживающие результаты. При полировании твердого сплава Т15К6 лучшие результаты [83] получены с использованием связки ВР-3Б при соотношении компонентов смеси, близком к 1 : 1. Кроме полировальных кругов, при финишных операциях находят все более широкое применение абразивные ленты, которые могут заменить фетровые и войлочные шлифовальные круги.

Абразивная лента представляет собой гибкое упругое шлифовальное полотно, изготовленное на тканевой или на бумажной основе. Основа ленты должна быть прочной, эластичной, иметь незначительное относительное удлинение. Для изготовления основы используют хлопчатобумажные ткани, киперную ткань, шифон, лавсан и другие синтетические материалы, а также специальные сорта бумаги. Лента может изготавливаться двумя способами: из бесконечных тканых или бумажных полос или склеиванием шлифовальной шкурки, предварительно нарезанной на

полосы требуемой ширины. Для производства лент из тканевых материалов наиболее широко применяются различные сорта сарж: легкая (СЛ), средняя (СС), утяжеленная (СУ), легкая отделанная (ОСЛ), средняя отделанная (ОСС), утяжеленная отделанная (ОСУ) и др., а из бумажных — марки БШ-120, БШ-140, БШ-200, БШ-240 и БША-265. Последние три марки бумаги применяются для изготовления шлифовальной шкурки из любого вида абразивного материала всех номеров зернистостей (от 50 до М40, а иногда и мельче), марка БШ-140 — для изготовления шкурки зернистостью 25 и мельче, а БШ-120 — только для шкурок, изготовленных из порошков кремния и стекла. Эти сорта бумаги используются для изготовления шлифовальной шкурки, предназначенной как для сухого шлифования и полирования, так и для шлифования с масляным, керосиновым или уайт-спиртовым охлаждением. Бумажная шлифовальная шкурка упомянутых сортов выпускается в рулонах и в листах. Ширина рулонов может быть 720, 800, 900, 1000 и 1250 мм, длина — от 20 до 100 м; ширина листов изменяется от 400 до 710, длина — от 560 до 900 мм.

В последнее время введен новый стандарт (ГОСТ 18277—72) на бумажную основу шлифовальной шкурки, используемой для сухой абразивной обработки. Эта основа изготавливается из сульфатной небеленой целлюлозы и выпускается следующих марок: О-140, О-200, О-210, О-235 и О-240. Марки О-140, О-200 и О-235 применяются для производства абразивной бумаги, используемой при шлифовании и полировании со средними нагрузками, а марки О-210 и О-240 — для повышенных нагрузок. Основа марок О выпускается в рулонах шириной 620, 720, 750, 900, 1000 и 1250 мм. Некоторые показатели упомянутых материалов приведены в табл. 27. Обновляется и стандарт на хлопчатобумажные ткани, предназначенные для основы шлифовальных шкурок. Ассортимент по саржам намечено увеличить до 13 единиц. Они будут выпускаться четырех групп (особо легкие, легкие, средние и утяжеленные) и двух видов (гладкоокрашенные и суровые). Внутри каждой группы саржи могут подразделяться на два номера: 1 и 2. По каждой группе, виду и номеру тканевой основы устанавливается определенный показатель удлинения и разрывной нагрузки как по основе, так и по утку.

Кроме основы 3 (рис. 14), лента состоит из абразивных зерен 1, клеевой связки 2 и аппрета 4. Аппретируются только бесконечные ленты. При аппретировании пропитывается обратная, т. е. нерабочая, сторона ленты. Аппретирование уменьшает вытяжку лент с одновременным повышением их прочности и жесткости. В качестве абразива применяют алмаз, эльбор, электрокорунды, карбиды кремния, кварц, стекло, гранат, кремний и т. д. Его наносят ровным слоем на одну из сторон основы. Абразив может наноситься электростатическим (ЭС) или механическим (МС) способом. Лучшие результаты дает электростатический способ, так как он обеспечивает более выгодное расположение абразивных зерен на ленте. Если при механическом способе зерна имеют «прикатанное» расположение (рис. 14, а), то при электростатическом для них характерно направленное, т. е. ориентированное, расположение (рис. 14, б). Зерна стараются ориентировать так, чтобы в процессе работы они созда-

Таблица 27

Параметры бумажной и тканевой основы, применяемой для изготовления лент

Основа и ее марка	Сопротивление разрыву, не менее, в направлении				Удлинение в продольном направлении, не более %
	продольном		поперечном		
	кГ	н	кГ	н	
Бумажная					
О-140	20	196,20	11	107,91	—
О-200	25	245,25	14	137,34	—
О-210	30	294,30	16	156,96	—
О-235	30	294,30	16	156,96	—
О-240	40	392,40	10	98,10	—
БШ-120	15	147,15	8	78,48	—
БШ-140	18	176,58	10	98,10	—
БШ-200	23	225,63	12	117,72	—
БШ-240	28	273,68	14	137,34	—
БШ-265	23	225,63	15	147,15	—
Тканевая					
Саржа легкая (СЛ)	95	931,95	28	274,68	8
Саржа средняя (СС)	120	1177,20	30	294,30	7
Саржа утяжеленная (СУ)	150	1471,50	35	343,35	6
Саржа легкая отделанная (ОСЛ)	105	1030,05	35	343,35	8
Саржа средняя отделанная (ОСС)	130	1275,30	35	343,35	7
Саржа утяжеленная отделанная (ОСУ)	160	1569,60	40	392,40	6

вали меньшие кинематические углы резания. Такой прием обеспечивает, с одной стороны, увеличение стойкости ленты за счет снижения сил резания и уменьшения осыпаемости зерен, с другой — способствует повышению производительности и качества обработанной поверхности. Этому же способствует и повышение однородности зернового состава абразивно-алмазного порошка. Зерновой состав абразивного материала должен

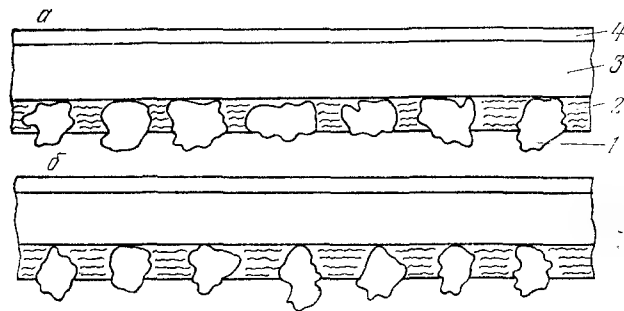


Рис. 14. Сечение абразивной ленты, изготовленной механическим (а) и электростатическим (б) способами

соответствовать ГОСТ 3647—71, а содержание основной фракции в зернистости составлять не менее 55%, а иногда и выше (до 60—70%). На наш взгляд, для алмазных и эльборовых абразивных порошков эта величина должна быть не менее 80%, а для лент, к которым предъявляются повышенные требования по гранулометрическому составу, например для абразивных, применяемых при полировании экранов кинескопов, крупных зеркал и ряда других поверхностей и материалов, этот процент должен быть еще выше.

Ориентация алмазных и эльборовых металлизированных зерен, покрытых материалом, обладающим магнитными свойствами, может производиться в магнитном поле. В этом случае можно осуществить и упорядоченное расположение зерен по рабочей поверхности ленты (рис. 15). Применение таких лент позволяет повысить их стойкость и улучшить качество поверхностного слоя за счет снижения сил резания и глубины деформации.

Абразивные зерна связываются с основой при помощи клеевой связки, в качестве которой используют мездровый, казеиновый и синтетиче-

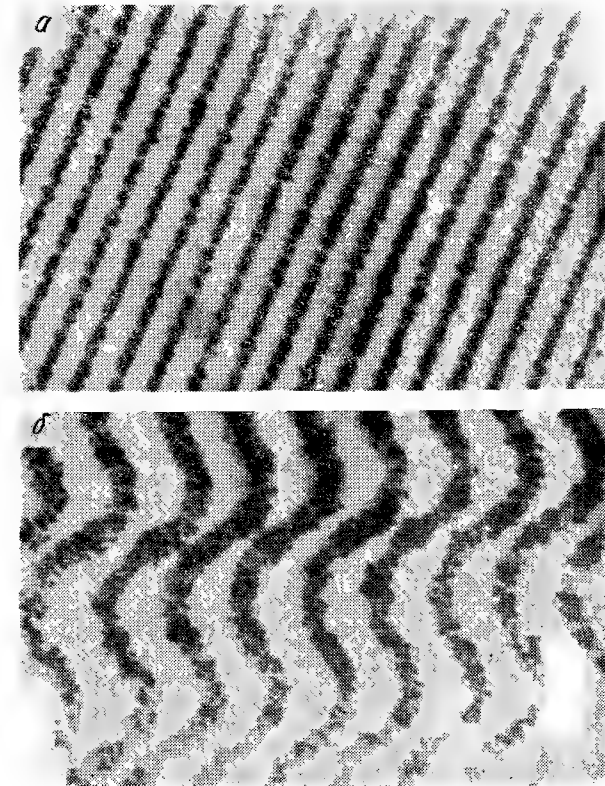


Рис. 15. Схемы упорядоченного расположения металлизированных зерен на ленте: а — наклонное; б — синусоидальное

Таблица 28
Абразивные шкурки из шлифпорошков и микропорошков, применяемых для изготовления склеиваемых лент

Вид абразивного материала	На тканевой основе		На бумажной основе		Водостойкая на тканевой основе		Водостойкая на бумажной основе	
	марка абразивного материала	номер зернистости	марка абразивного материала	номер зернистости	марка абразивного материала	номер зернистости	марка абразивного материала	номер зернистости
Электрокорунд нормальный	15А	12; 10; 8; 6; 5; 4; 3	15А	12; 10; 8; 6; 5; 4; 3				
	14А	12; 10; 8; 6; 5; М63; М50; М40	14А	12; 10; 8; 6; 5; М63; М50; М40	Э4, Э8	12; 10; 8; 6; 5; 4; 3	—	—
	13А	12; 10; 8; 6; 5; 4; 3	13А	12; 10; 8; 6; 5; 4; 3				
Электрокорунд белый	24А; 23А	12; 10; 8; 6; 5; 4	24А; 23А	12; 10; 8; 6; 5; 4	Э9; Э8	12; 10; 8; 6; 5; 4; 3	—	—

Электрокорунд хромистый	33А	12; 10; 8; 6	—	—	ЭХ	12; 10; 8; 6	—	—
Монокорунд	43А	12; 10; 8; 6; 5	—	—	М8; М7	12; 10; 8; 6	—	—
	44А	12; 10; 8	—	—				
Карбид кремния черный	55С; 54С; 53С	12; 10; 8; 6	55С; 54С; 53С	12; 10; 8; 6; 5	—	—	КЧ7; КЧ5	12; 10; 8; 6; 5; 4
Карбид кремния зеленый	64С; 63С	12; 10; 8; 6; 5; 4	64С; 63С	12; 10; 8; 6; 5; 4	К37; К36	12; 10; 8; 6; 5; 4	К36	12; 10; 8; 6; 5; 4
								М40, М28, М20, М14
Стекло	—	—	71F	12; 10; 8	—	—	—	—
Кремень	81кр	12; 10; 8	81кр	12; 10; 8	—	—	—	—

ские клеи, жидкое стекло или специальные лаки и смолы. Для абразивных лент и шкурок, изготавливаемых на бумажной основе и работающих всухую либо с масляным, либо с керосиновым охлаждением, применяется главным образом мездровый клей. Ленты и шкурки, работающие с водяным охлаждением, изготавливаются на специальных водостойких лаках и смолах. Для эльборовых шлифовальной шкурки, изготавливаемой на шифоне или на лавсане, применяется масляный лак ЯК-1 или пентафталевый лак ПФШ-4. Эльборовая шкурка выпускается зернистостью от Л8 до ЛМ5. Закрепление эльборовых и алмазных зерен может производиться также с помощью никеля или другого металла, осаждаемого гальваническим путем в электролитической ванне при непрерывном и равномерном движении ленты. В этом случае в качестве основы используется бесшовная тонкая металлическая лента.

В УкрНИИСМИ разработаны бесшовные и обычные алмазные ленты на связках Р1, Р4, Р5, Р6, Р8, Р9, Р11, Р14 и Р14Е с концентрацией алмазов 25, 50, 100 и 150%. Ленты изготавливаются на основе каучука и имеют различную эластичность. Наибольшей эластичностью обладают ленты Р1, несколько меньшей — Р4 и Р6. Ленты на связках Р8 и Р9 относятся к полужестким, Р5 и Р11 — к жестким, а Р14 — к особо жестким. Применение лент Р1 вместо Р14 позволяет уменьшить глубину деформированного слоя в 2—2,5 раза, однако наряду с этим уменьшается и производительность обработки. Основой для алмазных эластичных лент служит водостойкая капроновая (лавсановая) ткань. Выпускаются такие ленты в настоящее время зернистостью от АСМ 1 до АСМ 20. Особенности отделочной обработки алмазными лентами рассмотрены Е. Н. Масловым [79]. Опыты показывают, что применение отделочной обработки алмазными лентами позволяет повысить эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Исследования, проведенные Э. В. Рыжовым с соотр. [89], показали, что обработка деталей из стали ШХ15 алмазными лентами приводит к повышению контактной усталости.

Абразивная лента выпускается следующих типов: ЛС НТ — лента склеенная (бесконечная), неводостойкая на тканевой основе; ЛС НБ — лента склеенная (бесконечная), неводостойкая на бумажной основе; ЛС ВТ — лента склеенная (бесконечная), водостойкая на тканевой основе; Л НБ — лента неводостойкая на бумажной основе; Л НТ — лента неводостойкая на тканевой основе; Л ВТ — лента водостойкая на тканевой основе. Согласно ГОСТ 12439—66, абразивные ленты выпускаются шириной от 8 до 900 мм и длиной от 500 до 40 000 мм. В промышленности более широкое распространение получили склеенные ленты, однако стойкость их ниже, чем бесшовных. Характеристика абразивных лент, склеиваемых из шлифовальной шкурки, приведена в табл. 28¹. Для склеивания лент может применяться мездровый, казеиновый, БФ-6, эбонитовый клей или № 88. Соединение концов ленты производится шевронным, косым швом или другими способами.

¹ Параметры абразивных шкурок, применяемых для этих лент, регламентированы следующими стандартами: неводостойких на тканевой основе — ГОСТ 5009—68, на бумажной — ГОСТ 6456—68; водостойких на тканевой основе — ГОСТ 13344—67, на бумажной — ГОСТ 10054—62.

В зависимости от назначения шлифовальная шкурка может изготавливаться следующих типов: 1 — для машинной и ручной обработки металлов; 2 — для машинной и ручной обработки неметаллических материалов; 3 — для машинной обработки неметаллических материалов с редкой насыпкой абразивного зерна, покрывающего основу на 50—70%. Каждый из этих типов лент имеет различный показатель износостойкости. Показателем износостойкости служит отношение номера зернистости к осыпаемости. Величина осыпаемости определяется разностью веса двух полосок шкурки, взвешенных до и после испытания. Испытания проводятся на приборе КЗШ ВНИИАШ методом истирания шкурки о шкурку в течение 2 мин при нагрузке 5 кг (49,05 н). В зависимости от износостойкости шлифовальная шкурка выпускается двух (А и Б) или трех (А, Б и В) классов. Шлифовальная шкурка первого типа, выпускаемая на бумажной основе зернистостью 6—М40 класса А, имеет показатель износостойкости не менее 6, класса Б—4, класса В—3, а второго типа — соответственно 4, 3 и 2. Износостойкость шкурки на тканевой основе этих же зернистостей и классов выше на единицу.

Аналогично определяется износостойкость водостойких шлифовальных шкурок на тканевой основе. Износостойкость этих шкурок, изготовленных из электрокорундов зернистостей 8—12, должна быть для класса А не менее 10, для класса Б — не менее 6, для зернистостей 3—6 эти показатели соответственно равны 8 и 4, а для карбидкремневых шкурок эти же зернистостей показатель износостойкости ниже на 1—2 единицы.

Износостойкость водостойких шлифовальных шкурок на бумажной основе определяется по истирающей способности. За истирающую способность принимается разница в весе образцов органического стекла марки ПА, обрабатываемых на машине трения МИ-2 в течение 5 мин шлифовальной шкуркой формы диска с наружным диаметром 174 мм и внутренним отверстием 55 мм. Эти шкурки по истирающей способности подразделяются на два класса: А и Б. Для зернистости 16 истирающая способность шкурки на бумажной основе класса А должна быть не менее 850 г (0,85 кг), класса Б — не менее 700 г (0,7 кг), а для зернистости 4 — соответственно 300 и 200 г (0,3 и 0,2 кг). Для других зернистостей, находящихся между 16-й и 4-й, значения истирающей способности занимают промежуточное положение.

Кроме полировальных кругов и абразивных лент, для отделочной обработки иногда применяют текстильные полировальные жгуты. В процессе работы жгут покрывают полировальной пастой. Широкое распространение они получили при полировании беговых дорожек колес подшипников.

2. Прогрессивная технология производства разжимных притиров

До недавнего времени на заводах топливной аппаратуры применялась технология изготовления разжимных притиров малых диаметров (табл. 29, вариант 1). Ее недостатки — высокая трудоемкость изготовления и низкое качество притиров. По этой технологии проточку заготовок с

Два технологических варианта изготовления разжимных притиров

Таблица 29

I вариант. Старая технология				II вариант. Новая технология			
№ операции	вид обработки	станок		№ операции	вид обработки	станок	
		тип	кол-во			тип	кол-во
I	Подрезание торца, точение диаметра, сверление и развертывание отверстия, отрезка	1336M	10	I	Точение	Пресс 1336M	1
II	Снятие фаски	1336M	1	II	Рубка	Пресс К-2326	1
III	Точение	1616	2	III	Шлифование	3180	1
IV	Нарезание канавки	1616	1	IV	Фрезерование торцов, центровка, сверление и развертывание отверстия	Специальный автомат	2
V	Фрезерование паза	6H82	1	V	Термическая		
VI	Развертывание конуса	1336M	1	VI	Изготовление паза	736	1
VII	Шлифование	3161	2	VII	Шлифование	3161	1
VIII	Снятие фасок	1336M	1	VIII	Шлифование	3180	1
IX	Итого		19 станков	IX	Шлифование канавки	312 или 3A 64	1
				Итого			9 станков

одновременной обработкой конусного отверстия (конусностью от 1:20 до 1:50) производили на токарно-револьверных станках. Качество отверстия получалось низким по параметрам изогнутости оси и прямолинейности образующей конуса, так как обработка велась по «уведенному»

сверлом отверстие. После нарезания винтовых канавок с установкой притиров в центрах концы отверстия получали развальцовку. Для обеспечения некоторого изменения диаметра притира на его поверхности прорезается продольный паз шириной 0,5—1 мм. При прорезании продольного паза в отверстии оставались заусенцы, зачистить которые полностью было очень трудно.

Отмеченные недостатки устранены в новой прогрессивной технологии изготовления разжимных притиров (табл. 29, вариант II), разработанной при нашем участии. В ней принята новая последовательность операций механической обработки и предложены наиболее оригинальные способы для их выполнения. Получение заготовки на станке осуществляется проточкой чугуного прутка четырехрезцовою головкой; следующие операции — рубка (на прессе) проточенного прутка на штучные заготовки и их шлифование (на бесцентрово-шлифовальном станке). Полученные в виде роликов заготовки поступают на дальнейшую обработку. Для обработки конусного отверстия, выполняемого на IV операции, разработаны и внедрены специальные станки барабанного типа производительностью 300—720 деталей в 1 час.

На станке I станка (рис. 16) установлены плоские направляющие 2 и 8, по которым перемещаются многшпиндельные силовые головки 3 и 5, имеющие соответственно три и шесть рабочих шпинделей. Между головками расположены восьмипозиционный поворотный барабан 14 и неподвижные кондукторные плиты 13 и 15. Для фиксации барабана на каждой позиции имеется пневматический стопор 18. Периодический поворот барабана и рабочее перемещение силовых головок осуществляются при помощи кулачков распределительного вала 7, который получает вращение от отдельного электродвигателя 10 через редуктор 9.

Рабочий партиями укладывает заготовки притиров (ролики) в лоток 11, откуда они при помощи пневматического толкателя 4 направляются в зажимное устройство поворотного барабана. В барабане содержится восемь зажимных устройств (по числу позиций), каждое из которых выполнено в виде шестерни со встроенным внутри цанговым зажимом. При повороте шестерни происходит зажим или разжим притира в цанге.

Для поворота шестерни в барабане имеется восемь расположенных по радиусу зубчатых реек 12. Хвостовик каждой рейки имеет Т-образную форму. Перемещение реек осуществляется двумя пневмоцилиндрами. Пневмоцилиндр 17, расположенный на загрузочной позиции, захватывая хвостовик рейки, выдвигает ее из барабана и поворачивает шестерню, происходит зажим притира в цанге. Второй пневмоцилиндр 16, расположенный на приемной позиции, заталкивает выдвинутую рейку обратно в барабан, освобождая притир от зажимной цанги. Освобожденный притир выталкивается из зажимного устройства при помощи пневматического толкателя 6.

Всего барабан содержит шесть рабочих и две вспомогательные позиции. На первой рабочей позиции (табл. 29) выполняются подрезка торцов и центровка с двух сторон, на позициях 2, 3 и 4 производится последовательное сверление отверстия с двух сторон, на позициях 5 и 6 — черновое и чистовое развертывание конусного отверстия, на позиции 7 —

Принимаем

$$2N = \frac{q\pi(d_1 + d_2)}{2} b, \quad (5)$$

$$2F = 2Nf, \quad (6)$$

где q — интенсивность сил нормального давления на притир; $1/2(d_1 + d_2)$ — средний диаметр конического отверстия; b — длина притира; f — коэффициент трения.

Из уравнений (4) — (6) найдем

$$q = \frac{2P}{\pi b(d_1 + d_2) \left(\sin \frac{\alpha}{2} + f \cos \frac{\alpha}{2} \right)}. \quad (7)$$

Размеры разжимных притиров, применяемых, например, при доводке деталей топливной аппаратуры, позволяют воспользоваться для вывода расчетной формулы разрывного усилия теорией расчета толстостенных цилиндров [82]. Опасными точками в притире будут точки конической поверхности, расположенные по окружности диаметра d_2 . Для этих точек имеем

$$\sigma_t = q \left(\frac{1 + \Delta^2}{1 - \Delta^2} \right), \quad (8)$$

$$\sigma_r = -q. \quad (9)$$

Здесь σ_t и σ_r — нормальные напряжения в тангенциальном и радиальном направлениях; $\Delta = d_2/D$.

Согласно теории прочности Мора, эквивалентное напряжение в опасных точках

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_t - k\sigma_r = q \left(\frac{1 + \Delta^2}{1 - \Delta^2} + k \right), \quad (10)$$

где $k = \sigma_B/\sigma_C$; σ_B и σ_C — предел прочности чугуна соответственно при растяжении и сжатии.

Учитывая неравномерность распределения напряжений по толщине стенки притира, ее разрыв, очевидно, начнет происходить, если предел прочности чугуна на растяжение при изгибе $\sigma_{\text{из}}$ будет равен $\sigma_{\text{эКВ}}$. Следовательно, для момента появления трещины будет справедливо равенство

$$\sigma_{\text{из}} = q \left(\frac{1 + \Delta^2}{1 - \Delta^2} + k \right). \quad (11)$$

Тогда усилие $P_{\text{разр}}$, необходимое для разрыва притира, найдем из (7) и (11):

$$P_{\text{разр}} = \frac{\sigma_{\text{из}} \pi b(d_1 + d_2) \left(\sin \frac{\alpha}{2} + f \cos \frac{\alpha}{2} \right)}{2 \left(\frac{1 + \Delta^2}{1 - \Delta^2} + k \right)}. \quad (12)$$

Для экспериментальной проверки полученной расчетной формулы были проведены сравнительные испытания. Опыты проводились на универсальной машине УМ-5. Было изготовлено пять серий образцов-притиров. В каждой серии испытывалось до 160 образцов. Размеры образцов приведены в табл. 30.

Разрыв притиров с помощью конического пуансона производился в двух вариантах: без смазки пуансона (сухое трение) и с предварительной смазкой пуансона машинным маслом. Испытание по каждому варианту осуществлялось при скоростях нагружения 4, 10, 20 и 60 мм/мин.

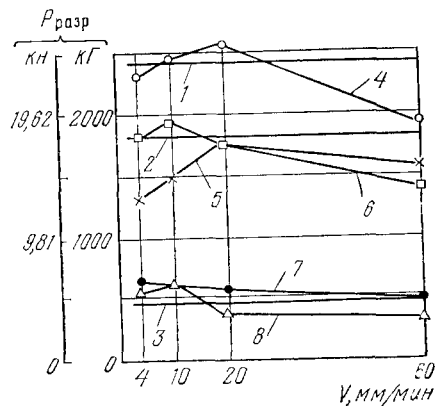


Рис. 18. Зависимость разрывного усилия от скорости нагружения при сухом трении: 1, 2, 3 — расчетные значения; 4, 5, 6 — экспериментальные значения для чугуновых притиров I, II, III серий (см. табл. 30); 5, 7 — экспериментальные значения для силицированных притиров IV и V серий

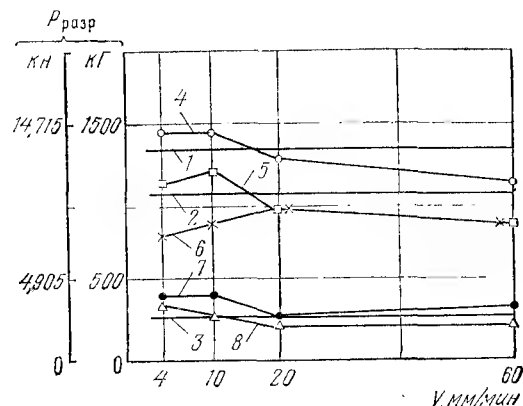


Рис. 19. Зависимость разрывного усилия от скорости нагружения при трении со смазкой: 1, 2, 3 — расчетные значения; 4, 5, 6 — экспериментальные значения для чугуновых притиров I, II и III серий (см. табл. 30); 6, 7 — экспериментальные значения для силицированных притиров IV и V серий

По полученным данным построены графики зависимости разрывного усилия от скорости нагружения как при сухом трении (рис. 18), так и при трении со смазкой (рис. 19). На этих же рисунках приведены расчетные данные (линии 1, 2, 3) разрывных усилий, подсчитанные по формуле (12). Для определения расчетных усилий принимались следующие значения коэффициента трения: при сухом трении (трение стали по чугуну) $f=0,15$, при наличии смазки $f=0,08$. Расчетное значение разрывного усилия при сухом трении, соответствующее линии 1 (рис. 18), равно 2380 кГ (23,3478 кН), линии 2 — 1830 кГ (17,9523 кН), линии 3 — 485 кГ (4,75785 кН). Аналогичное значение разрывного усилия при трении со смазкой, соответствующее линии 1 (рис. 19), равно 1340 кГ (13,1454 кН), линии 2 — 1030 кГ (10,1043 кН), линии 3 — 265 кГ (2,59965 кН).

Таблица 30

Характеристика образцов-притиров, разрываемых на УМ-5 коническим пуансоном

Серия	Марка чугуна	Термообработка	Твердость HB	σ_b			σ_c	σ_H	$\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ (МН/мм ²)				α , град (рад)	P разр., кг(кн)	
				σ_b	σ_c	σ_H			d_1	d_2	b	d		без смазки пуансона	со смазкой пуансона
I	СЧ 28-48	Отжиг, нормализация	217	28 (274,68)	100 (981)	48 (470,88)	100 (981)	48 (470,88)	8,8	65	5,6	6,7	1°10' (0,02041)	2380 (23,3478)	1340 (13,1454)
II	СЧ 21-40	Без термообработки	190	21 (206,01)	75 (735,75)	40 (392,4)	75 (735,75)	40 (392,4)	8,8	60	5,6	6,7	1°10' (0,02041)	1830 (17,9523)	1030 (10,1043)
III	СЧ 28-48	Отжиг, нормализация	217	28 (274,68)	100 (981)	48 (470,88)	100 (981)	48 (470,88)	6,0	17	3,5	4,4	2°50' (0,04955)	485 (4,75785)	265 (2,59965)
IV	СЧ 21-40	Силицирование	—	21 (206,01)	75 (735,75)	40 (392,4)	75 (735,75)	40 (392,4)	8,8	60	5,5	6,7	1°10' (0,02041)	—	—
V	СЧ 21-40	»	—	21 (206,01)	75 (735,75)	40 (392,4)	75 (735,75)	40 (392,4)	6,0	17	3,5	4,4	2°50' (0,04955)	—	—

Все испытанные образцы-притиры разрывались с образованием только одной продольной трещины, незначительно отклоняющейся от прямой продольной линии (рис. 20).

Полученные результаты показывают следующее: действительные значения разрывного усилия примерно соответствуют подсчитанным по формуле (12); наличие смазки между пуансоном и притиром приводит к уменьшению разрывного усилия на 30—40%; силицирование притиров существенного влияния на величину разрывного усилия не оказывает.

Для разрыва можно использовать различные высокопроизводительные станки и прессы, которые способны обеспечить возвратно-поступательное перемещение пуансона и необходимое для разрыва стенки притира усилие.

На Курском заводе тракторных запчастей для получения продольного паза на притирах корпуса распылителя использован поперечно-строгальный станок (рис. 21). На ползуне 5 закреплены гладкая конусная оправка-пуансон 3, конусность которой выполнена по коническому отверстию притиров 7, и толкатель 4 для перемещения притиров на лоток 2 и дальше в бункер 1. На подставке 9, закрепленной на столе 10 поперечно-строгального станка, установлены приспособление 8 и наклонный склиз 6 для приема и перемещения притиров в зону приспособления. При включении станка ползун вместе с конусной оправкой-пуансоном и толкателем совершает возвратно-поступательное перемещение. Рабочий укладывает притиры соответствующей стороной на наклонный склиз, с которого они постепенно скатываются в рабочую зону.

При движении вперед толкатель сдвигает первый притир на лоток, а конусная оправка-пуансон входит при этом в

Рис. 20. Продольная трещина на притире, полученная методом разрыва

конусное отверстие соседнего притира и, преодолевая сопротивление чугуна, разрывает стенку притира с образованием продольного паза. Возможное дальнейшее небольшое перемещение оправки пуансона вперед вызовет только незначительный упругий разжим притира по линии продольного паза (без искажения цилиндрической формы и увеличения ширины образовавшегося паза за счет остаточной пластической деформации) подобно тому, как притир натягивается на рабочую оправку при непосредственной абразивной доводке отверстия. При отходе оправки-пуансона и толкателя назад притиры, установленные на склизе, скатятся вниз и заполнят место первого притира, сдвинутого на лотке. Получающийся паз незначительно отклоняется от прямой линии — образующей цилиндрической поверхности.

Одна из самых трудоемких операций при изготовлении притиров — шлифование их наружной поверхности. Эта операция по старой технологии выполнялась на круглошлифовальных станках мод. 3161, 3151 и др. Перед шлифованием рабочий легким ударом молотка набивал притир на оправку, устанавливая ее в центрах станка, после шлифования снимал оправку, сбивая с нее обработанный притир, и набивал очередной.

В новой технологии для автоматизации этой операции (см. табл. 29, операция VII) разработано специальное приспособление (рис. 22), устанавливаемое на столе круглошлифовального станка. Приспособление

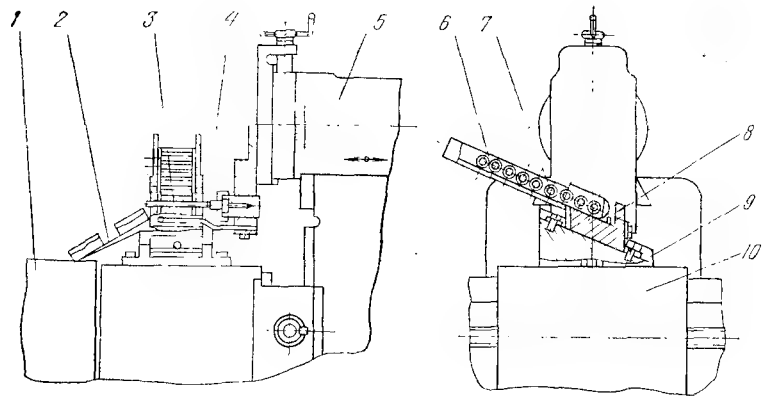


Рис. 21. Схема получения продольного паза на притире методом разрыва на поперечно-строгальном станке

смонтировано на опорной плите 1, которая жестко связывает его со столом. На ней закреплены корпус 8 опорного подшипника, упор 5, склиз 2, кронштейн 7 со свободно вращающимся опорным роликом 23 и микропереключателем 22, корпус 17 второго подшипника, ось 16 которого связана с П-образным корпусом 13. Со стороны задней бабки к корпусу 13 прикреплен пневмоцилиндр 42, на штоке которого установлены два толкателя 25 и 41 и съемник 44 с крючком. В средней части приспособления к корпусу 13 крепятся магазин 40, неподвижный центр 26 и кронштейн 29. На ось 28 кронштейна насажен поворотный барабан 27 с восемью специальными конусными оправками 43, конусность которых соответствует коническому отверстию в шлифуемых притирах. На противоположном конце оправки жестко закреплена шайба с выступом. На кронштейне 29 размещены фиксатор 15 и пружинный упор 39, регулирующий усилие напрессовывания притира на оправку. Для поворота барабана 27 служит специальный механизм, состоящий из рычага 21, оси 24, упора 19 с зубом 18 и пружины 20.

Со стороны коробки скоростей к корпусу 13 жестко прикреплен корпус 38 редуктора, червячное колесо 37 которого передает вращение кулачку 36. Упор 34, движущийся по внутренней канавке кулачка, и пружина 35 перемещают плавающий центр 33 и тягу 32. От водила 11, закрепленного на подвижном фланце 10 коробки скоростей, через

шестерни 12, 9, вал-червяк 6 и шестерни 4, 3, 14 вращение передается зубчатой втулке 31, вращающейся на игольчатом подшипнике. На этой втулке закреплен хомут 30. В процессе работы притиры партиями закладывают в магазин 40, ориентируя их большим диаметром отверстия к коробке скоростей станка.

Работает приспособление следующим образом. При нажатии зуба S (рис. 23) кулачка 36 (см. рис. 22) на микропереключатель 22 срабатывает установленный на гидрпанели станка электромагнитный пневмозолотник, открывая доступ воздуха в правую сторону пневмоцилиндра 42.

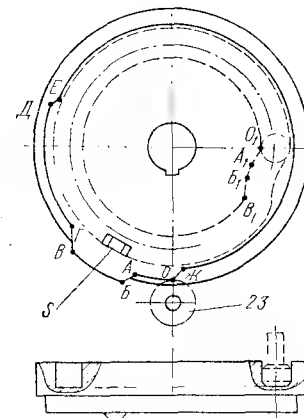


Рис. 23. Кулачок, управляющий работой приспособления

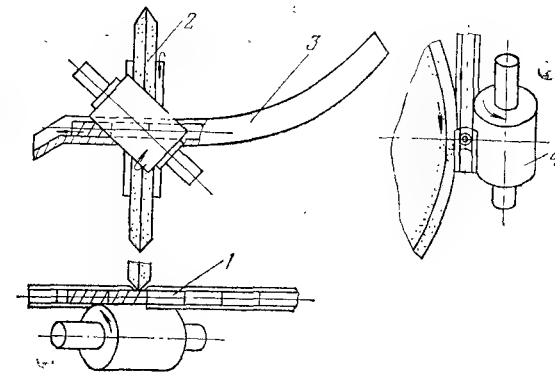


Рис. 24. Схема нарезания канавок на притире с использованием круглошлифовального станка

При этом толкатель 41 выталкивает очередной притир из магазина 40 и напрессовывает его на оправку 43 с силой, регулируемой упором 39. Толкатель 25 выпрессовывает оправку из притира, а съемник 44 крючком захватывает последний за торец. Если контакт зуба S с микропереключателем 22 прерывается, то толкатели и съемник начинают возвращаться в исходное положение. При этом съемник удерживает притир до тех пор, пока он не упадет на склиз 2. Одновременно перемещающийся по внутренней канавке (участок B₁—B₁, рис. 23) кулачка 36 (рис. 22) упор 34 передвигает плавающий центр 33 и втулку 31 к оправке с напрессованным притиром и зажимает ее в центрах пружины 35. Хомут 30, вступая в контакт с выступом шайбы, смонтированной на оправке 43, обеспечивает ей вращение. В это время ролик 23 контактирует с наружной канавкой кулачка 36 на участке B—B (рис. 23). С переходом ролика на участок B—Г корпус 13 (рис. 22) вместе с редуктором, барабаном 27 и оправками 43 поворачивается на осях 16 и 6 и вращающаяся оправка с притиром приближается к шлифовальному кругу. Начинается процесс шлифования.

Припуск с притира снимается при контакте ролика 23 с кулачком на участке Г—Д (рис. 23). В точке Д шлифование заканчивается и начина-

ется выхаживание, которое продолжается на участке $D-E-J$. При этом ролик не касается кулачка, а корпус 13 опирается на жесткий упор 5 (рис. 22), что обеспечивает точность и стабильность получаемого диаметра притира. При повороте корпуса 13 рычаг 21 поворачивается относительно оси 24 и занимает горизонтальное положение, а зуб 18 упора 19, переместившись вниз, занимает исходное положение. Ролик 23 вновь вступает в контакт с кулачком 36 на участке $J-O$ (рис. 23). При этом корпус 13 (рис. 22) вместе с закрепленными на нем деталями поворачивается относительно осей 16 и 6, оправка с прошлифованным притиром отводится от шлифовального круга и удерживается в этом положении при повороте кулачка на участке $O-A$ (рис. 23). В это время на участке O_1-A_1 упор 34 (рис. 22) и тяга 32 отодвигают плавающий центр 33, втулку 31 с хомутиком 30 и оправку с притиром от неподвижного центра 26. Рычаг 21, находящийся в горизонтальном положении, поворачивается относительно оси 24, и зуб 18 упора 19 приближается к выступу на барабане 27. При перемещении кулачка 36 на участке $A-B$ (рис. 23) происходит дальнейший поворот корпуса 13 относительно осей 16 и 6 (рис. 22) и дополнительный поворот рычага 21 относительно оси 24. При этом зуб 18 упора 19 упирается в выступ на барабане 27 и перемещает его на одно деление вперед. Положение барабана стопорится фиксатором 15. В этом случае плавающий центр 33 остается на участке A_1-B_1 (рис. 23), т. е. в отведенном состоянии. На этом цикл шлифования одного притира заканчивается. При дальнейшем повороте кулачка 36 (рис. 22) зуб 5 (рис. 23) нажимает на микропереключатель 22 (рис. 22) и по его команде происходит снятие и напрессовывание очередных притиров. После этого цикл повторяется.

При данном способе производительность процесса шлифования притиров определяется числом оборотов кулачка 36. Она выражается следующей зависимостью:

$$W = n_k = n_{дв} \cdot 60 \cdot \frac{z_{12}}{z_9} \cdot \frac{q}{z_{37}}, \quad (13)$$

где W — производительность, шт/час; z_9 , z_{12} и z_{37} — число зубьев колес 9, 12 и 37; q — число заходов червяка; $n_{дв}$ — число оборотов двигателя вращения детали (води́ла 11) за 1 мин; n_k — число оборотов кулачка 36 за 1 час.

Применение новой операции получения продольного паза (см. табл. 29, операция VI) позволило для окончательного шлифования притиров использовать бесцентрово-шлифовальные станки. Если при разрезном продольном пазе этого сделать было невозможно, так как для обработки необходима оправка, которая закреплялась бы в центрах станка, то паз в виде зигзагообразной трещины позволил применить бесцентрово-шлифовальные станки. В результате производительность труда на этой операции возросла в 2—3 раза.

При изготовлении притиров весьма трудоемкой является и операция нарезания канавок на рабочей поверхности. По старой технологии она выполнялась на токарном станке. В новой технологии эта операция заменена шлифованием на круглошлифовальном станке. Схема операции

приведена на рис. 24. Притиры 1, располагаясь в наклонном лотке 3, перемещаются в зону обработки автоматически. В процессе шлифования притиры зажимаются между шлифовальным кругом 2 и резиновым катком 4, который расположен под некоторым углом к оси притира. Во вращение каток приводится от электродвигателя передней бабки станка. Перемещение притира по лотку и шлифование канавки осуществляются одновременно.

Новая технология апробирована на ряде заводов, производящих притиры для доводки деталей топливной аппаратуры. Она позволяет получать притиры практически без искривления оси отверстия, биение притира на оправке не превышает 0,005, нецилиндричность рабочей поверхности в пределах 0,005—0,010 мм.

3. Теоретическое и экспериментальное исследование сил и моментов, удерживающих разжимный притир на доводочной оправке

Анализ устройств для крепления притиров. Для крепления разжимных притиров применяют устройства, схемы которых представлены на рис. 25. Основной деталью этих устройств является доводочная оправка (позиции 2—4). Прочное сцепление притира с оправкой предохраняет его от проворачивания или перемещения в осевом направлении и от заклинивания в отверстии. Кроме того, с помощью доводочных оправок осуществляется периодический разжим притира в процессе доводки. Если при доводке вручную устройство для крепления состоит из одной лишь доводочной оправки 2 (рис. 25, а), то при доводке на станках с механическим управлением (рис. 25, б), кроме оправки, в него входит втулка 5, которая служит для периодического разжима притира. На станках с автоматическим разжимом притира (рис. 25, в, г, д) устройство для крепления еще более сложное. Притир в нем располагается на оправке-игле 4. Для фиксации положения притира использованы струна 6 и втулка 5. Разжим осуществляется перемещением оправки-иглы 4 вдоль оси.

Из приведенных решений видно, что основной силой, удерживающей притир на доводочной оправке, является сила трения между притиром и оправкой. Если сила трения мала, то притир может как поворачиваться на оправке, так и перемещаться в осевом направлении. Такое положение характерно для первых двух устройств (рис. 25, а, б). Конструкции последних трех вариантов более совершенны. Здесь притир не имеет возможности перемещаться в осевом направлении. Однако контакт притира с оправкой в последних вариантах осуществляется не на всей длине притира, а лишь на ее части, что уменьшает силу трения. Поэтому в некоторых последних конструкциях устройств для крепления притиров имеются попытки этот недостаток устранить введением шпонок-штифтов 7 (рис. 25, г) или изготовлением на торце притира выступов (рис. 25, д). Применение шпонок-штифтов или выступов усложняет конструкцию устройства и возможно лишь при определенной кинематике процесса.

Анализ приведенных устройств показывает, что прочность сцепления притира с оправкой зависит не только от принятого способа крепления притира, но и от его конструктивных параметров. Поэтому, очевидно, основным путем для обеспечения доводки без проворачивания притира и соответственно без заклинивания его в отверстии является правильный выбор конструктивных размеров притира. Размеры притира должны быть оптимальными. Например, при недостаточной толщине притира он не удерживается на оправке, а при слишком большой теряет способность разжиматься. Кроме того, при большой толщине и малом наруж-

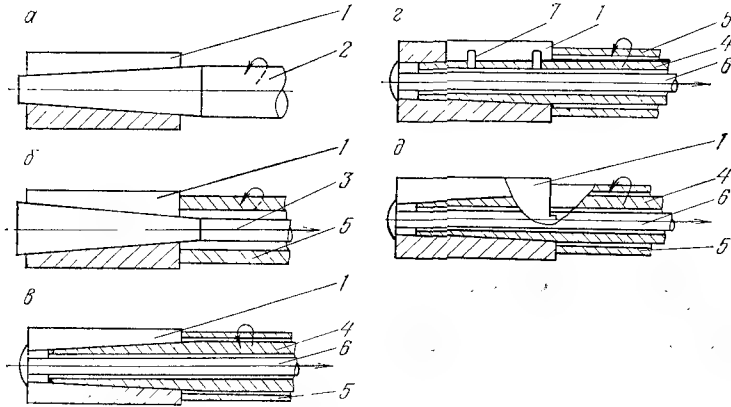


Рис. 25. Способы крепления притиров: а — при доводке вручную; б, в, г, д — при доводке с механическим разжимом притира; 1 — притир; 2 — оправка; 3 — оправка с обратным конусом; 4 — втулка-игла; 5 — втулка упорная; 6 — струна; 7 — штифт

ном диаметре (до 10 мм) внутреннее отверстие становится настолько малым, что опытным путем трудно установить оптимальные размеры притира. В таких условиях невозможно гарантировать надежную работу другим расположенным внутри притира деталям, а соответственно и всему устройству в целом. Эта проблема особенно важна при массовой доводке малых отверстий, например в деталях топливной аппаратуры. Несмотря на широкое распространение процесса абразивной доводки отверстий и значительное конструктивное разнообразие разжимных притиров, методики расчета оптимальных размеров разжимного притира нет.

Названные проблемы побудили нас провести теоретическое и экспериментальное исследование сил и моментов, действующих на площадках контакта разжимного притира и оправки. Нам представляется, что такое исследование даст возможность создать методику проектирования разжимных притиров.

Усилия при разжиме притира. Разжим притира осуществляется при перемещении его по конической оправке. При этом ширина продольного паза постепенно увеличивается (рис. 26). Ввиду малой конусности внутренней поверхности ее можно принять за цилиндр. Условно примем, что разжим притира осуществляется под действием внутреннего давления

q_c , равномерно распределенного по средней линии кольца. Изменение этой нагрузки вызывает соответственно изменение ширины продольного разреза. В общем случае ширина продольного разреза S состоит из начальной ширины S_n и изменения этой ширины ΔS под действием приложенной нагрузки:

$$S = S_n + \Delta S. \quad (14)$$

Величина ΔS складывается из одинаковых перемещений $\Delta S/2$ двух свободных концов (створок) торцового сечения притира.

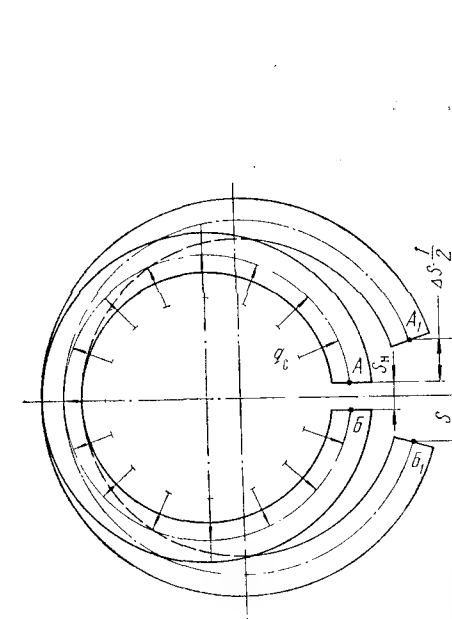


Рис. 26. Изменение ширины паза притира при его разжиме

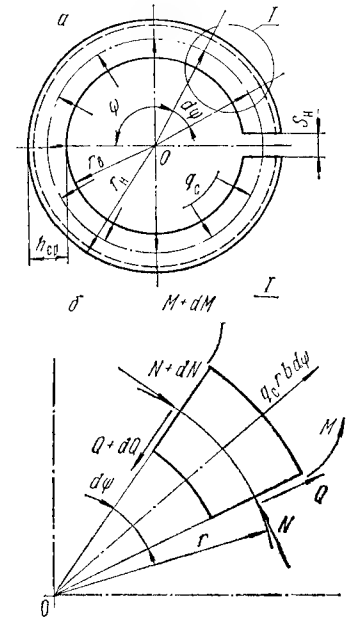


Рис. 27. К расчету усилия разжима притира: а — притир; б — элемент сечения притира

Установим зависимость между изменением ширины паза ΔS и нагрузкой q_c . Сначала найдем зависимость ΔS от изгибающего момента M , возникающего под действием нагрузки q_c . Для установления такого соотношения из сечения притира (рис. 27, а) выделим элемент $d\psi$ и отнесем его к полярным координатам r и ψ (рис. 27, б). Взаимодействие выделенного элемента с отброшенными частями заменим поперечными силами Q и $Q+dQ$, нормальными силами N и $N+dN$ и изгибающими моментами M и $M+dM$. Кроме того, на выделенный элемент действует нагрузка $q_c r b d\psi$ (b — длина притира). Спроектировав все силы на биссектрису угла $d\psi$ и пренебрегая малыми величинами второго порядка, найдем

$$-dQ + q_c r b d\psi + N d\psi = 0. \quad (15)$$

Проектирование же сил на плоскость, перпендикулярную биссектрисе угла $d\psi$, дает

$$dN + Qd\psi = 0. \quad (16)$$

Условие равновесия моментов сил относительно центра O (рис. 27) имеет вид

$$dM + r dN = 0. \quad (17)$$

Разделив обе части равенств (15) — (17) на $d\psi$, получим

$$\frac{dQ}{d\psi} - N = b q_c r, \quad (18)$$

$$\frac{dN}{d\psi} + Q = 0, \quad (19)$$

$$\frac{dM}{d\psi} + r \frac{dN}{d\psi} = 0. \quad (20)$$

Исключая из уравнений (19) и (20) N , получаем

$$Q = \frac{1}{r} \cdot \frac{dM}{d\psi}. \quad (21)$$

Из уравнений (18), (20), (21) имеем

$$\frac{d^3 M}{d\psi^3} + \frac{dM}{d\psi} = br \frac{dq_c}{d\psi}. \quad (22)$$

Проинтегрировав это выражение, получим

$$\frac{d^2 M}{d\psi^2} + M = br^2 q_c + C. \quad (23)$$

Для нахождения коэффициента C используем следующие начальные условия:

$$\psi = \pi, \quad M = 0, \quad N = 0.$$

Из выражений (22), (23) имеем

$$\frac{d^2 M}{d\psi^2} = br^2 q_c + rN. \quad (24)$$

В итоге получаем $C = M + rN$. Так как при $\psi = \pi$ величины M и N равны нулю ($M = 0, N = 0$), то и $C = 0$.

Таким образом, зависимость между давлением и изгибающим моментом в любом сечении под углом ψ имеет вид

$$q_c = \frac{1}{br^2} \left(M + \frac{d^2 M}{d\psi^2} \right). \quad (25)$$

Для случая равномерно распределенной нагрузки $q_c = \text{const}$. Тогда

$$M + \frac{d^2 M}{d\psi^2} = q_c br^2 = \text{const}. \quad (26)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид

$$M = C_1 \cos \psi + C_2 \sin \psi + q_c br^2. \quad (27)$$

Для определения C_1 и C_2 примем следующие начальные условия:

$$\psi = \pi, \quad M = 0, \quad M' = 0.$$

В итоге имеем

$$C_1 = q_c r^2 b,$$

$$C_2 = 0.$$

Подставив полученные значения в уравнение (27), получим

$$M = q_c r^2 b \cos \psi + q_c r^2 b = q_c r^2 b (1 + \cos \psi). \quad (28)$$

Для случая, когда искомое сечение задано углом $\varphi = (180 - \psi)$, соотношение между изгибающим моментом M и нагрузкой q_c имеет вид

$$M = q_c br^2 (1 - \cos \varphi). \quad (29)$$

Интересующее нас перемещение, обозначаемое $\Delta S_M/2$, свободного конца торцового сечения притира (например, точки A на рис. 26) под действием изгибающего момента M определим с помощью интеграла Мора

$$\frac{\Delta S_M}{2} = \int_0^S \frac{M \bar{M} dS}{EI}, \quad (30)$$

где M — изгибающий момент от равномерно распределенной нагрузки q_c ($M = -q_c br^2 (1 - \cos \varphi)$); $\bar{M}$ — изгибающий момент от единичной силы, приложенной в рассматриваемом сечении ($\bar{M} = -1r(1 - \cos \varphi)$); E — модуль упругости; I — момент инерции ($I = 1/12 b h_{\text{ср}}^3$); $h_{\text{ср}}$ — средняя толщина стенки, равная разности наружного r_n и внутреннего r_v радиуса притира (рис. 27).

Подставив значения M и $\bar{M}$, получим

$$\frac{\Delta S_M}{2} = \int_0^S \frac{M \bar{M}}{EI} dS = \int_0^S \frac{q_c br^3}{EI} (1 - \cos \varphi)^2 dS,$$

или

$$\frac{\Delta S_M}{2} = \int_0^\pi \frac{q_c br^3}{EI} (1 - \cos \varphi)^2 d\varphi = \frac{3\pi q_c br^4}{2EI}.$$

Общее перемещение двух свободных концов притира под действием только изгибающего момента равно

$$\Delta S_M = \frac{3\pi q_c b r^4}{EI}. \quad (31)$$

Учтем перемещение створок притира от действия нормальной N и поперечной Q сил. Поперечная и нормальная силы в сечении, определяемом

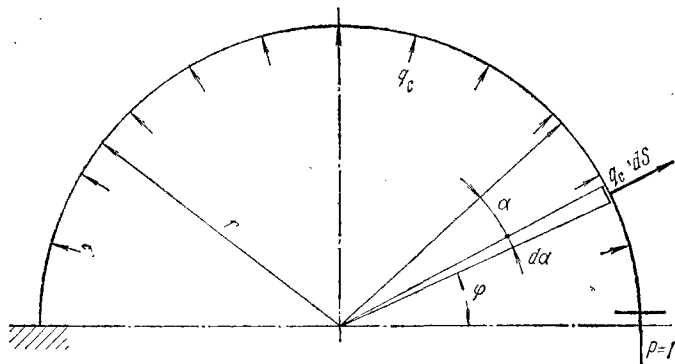


Рис. 28. Перемещение створок разжимного притира под действием равномерно распределенной нагрузки

углом φ , от элементарной силы $q_c dS = q_c r b d\alpha$ (рис. 28) равны

$$dN = q_c dS \sin \alpha = q_c r b \sin \alpha d\alpha, \quad (32)$$

$$dQ = q_c dS \cos \alpha = q_c r b \cos \alpha d\alpha, \quad (33)$$

$$N = \int_0^\varphi q_c r b \sin \alpha d\alpha = -q_c r b \cos \alpha \Big|_0^\varphi = -q_c r b \cos \varphi + q_c r b = q_c r b (1 - \cos \varphi), \quad (34)$$

$$Q = \int_0^\varphi q_c r b \cos \alpha d\alpha = q_c r b \sin \alpha \Big|_0^\varphi = q_c r b \sin \varphi. \quad (35)$$

Такие же значения сил N и Q можно получить, используя зависимости (18) — (21) и (28), (29).

В опасном сечении ($\varphi = \pi$) имеем

$$N = 2q_c r b, \quad Q = 0.$$

Поэтому перемещение створок притира учтем только от действия силы N . Вертикальное перемещение $\Delta S_N/2$ створки от действия силы N найдем с применением интеграла Мора (рис. 28)

$$\frac{\Delta S_N}{2} = \int_0^\pi \frac{N \bar{N} dS}{EF_s} \quad (36)$$

($N = -q_c r b (1 - \cos \varphi)$; $\bar{N} = -1 \sin \varphi$; F_s — площадь сечения притира, $F_s = b h_{cp}$ (см. рис. 27))

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S_N}{2} &= \int_0^\pi \frac{q_c r b}{EF_s} (1 - \cos \varphi) \sin \varphi dS = \frac{q_c r^2 b}{EF_s} \int_0^\pi (1 - \cos \varphi) \sin \varphi d\varphi = \\ &= \frac{q_c r^2 b}{EF_s} \left[\int_0^\pi \sin \varphi d\varphi - \int_0^\pi \sin \varphi (\sin \varphi) d\varphi \right] = \\ &= \frac{q_c r^2 b}{EF_s} \left[\left| 1 - \cos \varphi \right|_0^\pi - \left| \frac{\sin^2 \varphi}{2} \right|_0^\pi \right] = \frac{2 q_c r^2 b}{EF_s}. \end{aligned}$$

Расхождение двух створок притира от силы N равно

$$\Delta S_N = \frac{4 q_c r^2 b}{EF_s}. \quad (37)$$

В итоге общее расхождение двух створок притира от момента M и силы N

$$\Delta S = \Delta S_M + \Delta S_N,$$

или

$$\Delta S = \frac{q_c r^2 b}{E} \left(\frac{3\pi r^2}{I} + \frac{4}{F_s} \right). \quad (38)$$

При известной величине ΔS зависимость (38) можно использовать для нахождения величины равномерно распределенной нагрузки q_c :

$$q_c = \frac{\Delta S E}{r^2 b \left(\frac{3\pi r^2}{I} + \frac{4}{F_s} \right)}. \quad (39)$$

Например, при $\Delta S = 0,6$ мм, $r = 4$ мм, $b = 60$ мм необходимое усилие $q_c = 10$ кг/см² (98,1 н/см²).

Силы и момент трения на поверхности контакта притира и доводочной оправки. Сила трения $F_{тр}$ (рис. 29), обусловленная действием равномерно распределенной нагрузки q_c , действующая по всей поверхности и условно приложенная в одной точке, равна

$$F_{тр} = q f \mu, \quad (40)$$

где q — давление, равномерно распределенное по внутренней поверхности притира, связанное с q_c следующей зависимостью:

$$q = q_c \frac{r}{r_{cp}}; \quad (41)$$

$f = \pi d_{cp} b$ — площадь внутренней поверхности притира; b — длина притира μ — коэффициент трения.

После преобразования находим

$$F_{\text{тр}} = q_c \frac{r}{r_{\text{ср}}} \pi d_{\text{ср}} b \mu = 2 q_c r \pi b \mu. \quad (42)$$

Заменив в (42) q_c по зависимости (39), получим

$$F_{\text{тр}} = \frac{2 \pi f E \Delta S}{r \left(\frac{3 \pi r^2}{I} + \frac{4}{F_s} \right)}. \quad (43)$$

Для определения осевой силы можно принять, что $F_{\text{тр}} = P_o$. Зная силу трения, можно определить усилие, необходимое для перемещения притира в осевом направлении, т. е. осевую силу P_o .

Момент трения $M_{\text{тр}}$, препятствующий проворачиванию притира на оправке, определим по следующей зависимости:

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} r_{\text{ср}},$$

или

$$M_{\text{тр}} = \frac{2 \pi f E \Delta S r_{\text{ср}}}{r \left(\frac{3 \pi r^2}{I} + \frac{4}{F_s} \right)}. \quad (44)$$

Произведем замену $I = 1/12 b h_{\text{ср}}^3$ и $F_s = b h_{\text{ср}}$. Имеем

$$M_{\text{тр}} = \frac{2 \pi f E \Delta S b h_{\text{ср}}^3 r_{\text{ср}}}{r (36 \pi r^2 + 4 h_{\text{ср}}^2)}. \quad (45)$$

Полученная формула позволяет теоретически рассчитать момент трения, препятствующий провороту притира на оправке. Зная эту величину, его можно сравнить с моментом внешних сил, действующих на притир. Кроме того, эта формула позволяет правильно подойти к выбору конструктивных элементов притира. Известно, что расхождение створок притира ΔS при его перемещении по оправке имеет предел, после которого

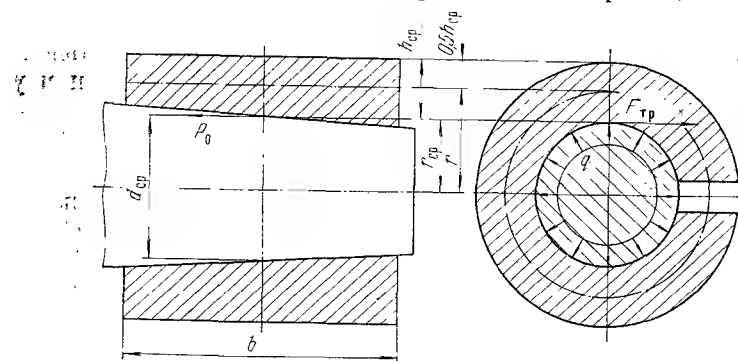


Рис. 29. Силы трения, удерживающие разжимный притир на доводочной оправке

происходит разрушение (разлом) притира. Предельное значение ΔS , очевидно, будет зависеть от таких параметров, как толщина стенки притира, радиус, материал притира и др. В производственной практике эти параметры выбираются опытным путем. Обоснованных экспериментальных и расчетных рекомендаций или теоретических данных, опубликованных по этому вопросу в печати, насколько нам известно, нет. Знание же их весьма необходимо при проектировании разжимных притиров.

Для установления зависимости величины предельного значения ΔS от ряда переменных факторов, а также экспериментальной проверки полученных теоретических формул (44), (45) нами было проведено несколько серий опытов.

Методика и результаты экспериментов по исследованию допустимого разжима притиров. Использовались чугунные притиры из СЧ 28-48, размеры которых были приняты в соответствии с размерами притиров, применяемых для доводки деталей топливной аппаратуры. Исследовались три разновидности притиров: твердостью HB 217 (подверженные нормализации), HB 190 (без термообработки), HB 170 (отжиг).

В качестве переменных параметров были приняты (рис. 30) радиус

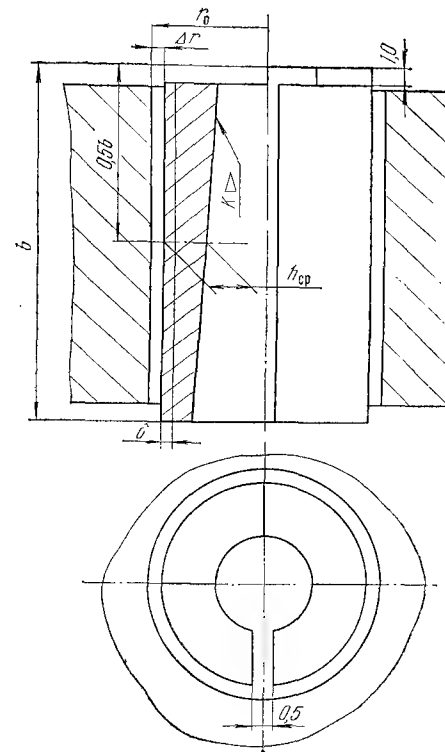


Рис. 30. Параметры разжимного притира и доводимого отверстия

доводимого отверстия r_0 , средняя толщина стенки притира $h_{\text{ср}}$, конусность поверхности его K , зазор между притиром и отверстием Δr , износ притира δ . Опыты осуществлялись по методике полного факторного эксперимента. Уровни переменных факторов и порядок проведения экспериментов приведены в матрице планирования (табл. 31). Предварительные эксперименты по определению наибольшего допустимого разжима притира ΔS показали, что разжим притира сначала сопровождается упругой деформацией, а затем пластической с последующим разрушением. Понятно, что наиболее важно иметь данные по величине ΔS , соответствующей не началу разлома притира, а моменту появления первых остаточных деформаций. Когда такой момент достигнут, после снятия с оправки притир остается разжатым и не возвращается в исходное положение. Поэтому нами в качестве выходного параметра вместо ΔS

Таблица 31

Матрица планирования и результаты экспериментов для притиров НВ 217

Уровни	r		h_{cp}	K	Δr	δ	Результаты опытов, мм		
	$мм$		$мм$						
	+	4,25 3,0	1,4 0,7		1:20 1:50	0,10 0,02	0,10 0,02	D_H	D_K
1	+	+	+	+	+	8,05	8,30	0,25	
2	—	+	+	+	+	5,60	5,70	0,10	
3	+	—	+	+	+	8,05	8,65	0,60	
4	—	—	+	+	+	5,60	6,00	0,40	
5	+	+	+	—	+	8,05	8,30	0,25	
6	—	+	+	—	+	5,60	5,70	0,10	
7	+	—	—	—	+	8,05	8,75	0,70	
8	—	—	—	—	+	5,60	6,00	0,40	
9	+	+	+	+	—	8,25	8,50	0,25	
10	—	+	+	+	—	5,80	5,85	0,05	
11	+	—	—	+	—	8,25	9,00	0,65	
12	—	—	—	+	—	5,80	6,25	0,45	
13	+	+	+	—	—	8,25	8,45	0,20	
14	—	+	+	—	—	5,80	5,95	0,15	
15	+	—	—	—	—	8,25	8,85	0,60	
16	—	—	—	—	—	5,80	6,15	0,35	
17	+	+	+	+	+	8,30	8,45	0,15	
18	—	+	+	+	—	5,75	5,80	0,05	
19	+	—	—	+	—	8,30	8,70	0,40	
20	—	—	—	+	—	5,75	6,05	0,30	
21	+	+	+	—	—	8,30	8,55	0,25	
22	—	+	—	—	—	5,75	5,90	0,15	
23	+	—	—	—	—	8,30	8,85	0,55	
24	—	—	—	—	—	5,75	6,10	0,35	
25	+	+	+	+	—	8,40	8,55	0,15	
26	—	+	+	—	—	5,95	6,00	0,05	
27	+	—	—	+	—	8,40	8,90	0,50	
28	—	—	—	—	—	5,95	6,20	0,25	
29	+	+	—	—	—	8,40	8,65	0,25	
30	—	+	—	—	—	5,95	6,00	0,05	
31	+	—	—	—	—	8,40	8,90	0,50	
32	—	—	—	—	—	5,95	6,30	0,35	

принята величина упругого изменения диаметра притира Δd_y , представляющая собой разность диаметров притира в свободном состоянии D_H и разжатом D_K до появления первых пластических деформаций.

В доводочных станках последних конструкций для перемещения притира прикладывается определенная статическая нагрузка. Такой принцип приложения нагрузки сохранен и в наших опытах. Для этого использовали пресс мод. МИП-100 с ценой деления нагрузочной шкалы 0,2—0,5 кГ (1,962—4,905 Н). Изменение величины Δd_y достигалось нагружением притира, расположенного на оправке, осевой силой. Замеры диаметра притира производили плавающей рычажной скобой с ценой деления шкалы 0,001 мм. Было установлено, что начало пластической деформации при разжиге притира связано с приложением наибольшей (крити-

ческой) величины осевого усилия. Это совпадает с классическим случаем разрыва цилиндрического образца на разрывной машине. В случае, когда к притиру приложено критическое осевое усилие, движение стрелки динамометра временно приостанавливается, упругая деформация переходит в пластическую. При этом сменяющая упругую пластическая деформация для своего осуществления требует приложения меньшего усилия, поэтому дальнейший разжим притира производится уже с одновременным движением стрелки динамометра в обратную сторону. Контрольное упругое увеличение диаметра притира фиксировалось в опытах в момент начала обратного движения стрелки динамометра.

Результаты экспериментов для первой разновидности притиров (НВ 217) приведены в табл. 31. Статистическая обработка результатов позволила получить следующую математическую зависимость:

$$0,3 + 0,086 r - 0,15 h_{cp} + 0,036 \delta = \Delta d_y. \quad (46)$$

Анализ зависимости показывает, что зазор Δr и конусность K внутренней поверхности притира в исследованном интервале практически не оказывают влияния на величину Δd_y . Увеличение радиуса r притира повышает упругий разжим, а увеличение толщины стенки h_{cp} , наоборот, уменьшает его.

Действие износа притира δ равносильно уменьшению толщины стенки притира. Полученная зависимость на рис. 31 представлена графически. Здесь же даны экспериментальные кривые для притиров твердостью НВ 190 и НВ 170. Из рисунка видно, что наибольшей упругостью обладают притиры твердостью НВ 217, а самой малой — НВ 170. Это означает, что с уменьшением твердости чугуна теряет упругие свойства.

Методика и результаты исследования сил трения на площади контакта притира и оправки. Определялись истинные значения момента трения и осевой силы, а также влияние ряда переменных факторов на эти величины. На основе формул (44) и (45) в качестве переменных факторов были приняты радиус доводимого отверстия, средняя толщина стенки притира, зазор между притиром и отверстием, длина и износ притира, конусность (см. рис. 30). Эксперименты осуществлялись по методике полного факторного эксперимента типа 2^n , где n — число переменных факторов (в нашем случае 6).

Эксперименты заключались в следующем (рис. 32). Притир 1 помещался на оправку 4, которая закреплялась в специальном приспособлении, устанавливаемом на столике пресса МИП-100. Под действием возрастающей нагрузки P_0 обеспечивалось перемещение притира по оправке. Как только диаметр притира достигал контрольного значения, нагружение притира приостанавливалось и приложенная к нему осевая сила P_0 фиксировалась. Далее производились замеры момента трения $M_{тр}$: к рычагу 2 прикладывалась сила P_i до момента проворачивания притира на оправке. Проворачивание обеспечивалось тем, что притир 1 и втулка 3 имеют по два уступа высотой 1 мм. Момент трения, соответствующий началу проворачивания притира на оправке, определялся как произведение приложенной к рычагу 2 силы P_i на плечо рычага l . Момент трения и осевая сила притиров, изготовленных на нижнем уровне

параметра r , фиксировались при диаметре 6 мм, а притиров, изготовленных на верхнем уровне, — при диаметре 8,5 мм.

Для установления влияния смазки на величину момента трения и осевой силы были проведены эксперименты с предварительным окунанием оправки в машинное масло. Статистическая обработка результатов позволила получить математические зависимости в виде полиномов первой степени, отражающих влияние переменных факторов на $M_{тр}$ и P_o . Коэффициенты регрессии полученных уравнений приведены в табл. 32

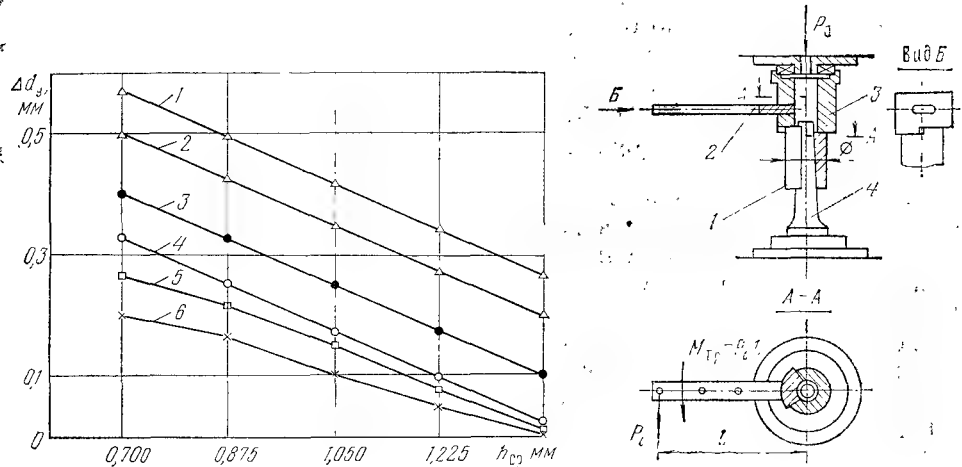


Рис. 31. Влияние толщины стенки притира на допустимый упругий разжим чугуных притиров различных диаметров, твердостей и износа: 1, 2 — Ø 8,5 мм; 3, 4, 5, 6 — Ø 6 мм; 1, 2, 3, 4 — НВ 217; 5 — НВ 190; 6 — НВ 170; 1, 3 — $\delta=0,1$ мм; 2, 4, 5, 6 — $\delta=0,2$ мм

(незначимые величины коэффициентов подчеркнуты в таблице одной чертой). Окончательно уравнения регрессии для притиров НВ 217 (при нагружении без смазки) имеют вид

$$P_o = 28,7 - 9,2 X_1 + 5,4 X_2 + 17,9 X_3 + 7,1 X_5 - 2,0 X_1 X_2 - 5,3 X_1 X_3 - 1,9 X_1 X_4 + 2,0 X_2 X_3 - 2,3 X_2 X_6 + 5,3 X_3 X_5, \quad (47)$$

$$M_{тр} = 60 - 13 X_1 + 11 X_2 + 33,5 X_3 + 17 X_5 - 5,5 X_1 X_2 - 7,0 X_1 X_3 - 6,0 X_2 X_6 + 12,5 X_3 X_5. \quad (48)$$

Анализируя полученные зависимости, видим, что P_o и $M_{тр}$ уменьшаются с увеличением радиуса притира. Зазор, толщина стенки и длина притира увеличивают осевую силу и момент трения. Конусность внутренней поверхности (X_4) и износ притира (X_6) оказывают весьма малое влияние. Малое влияние износа притира можно объяснить тем, что с увеличением δ уменьшается толщина стенки притира. Однако разжим

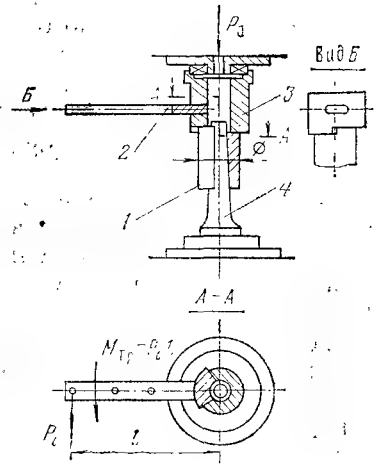


Рис. 32. Приспособление для экспериментального определения осевой силы и момента проворачивания притира на оправке

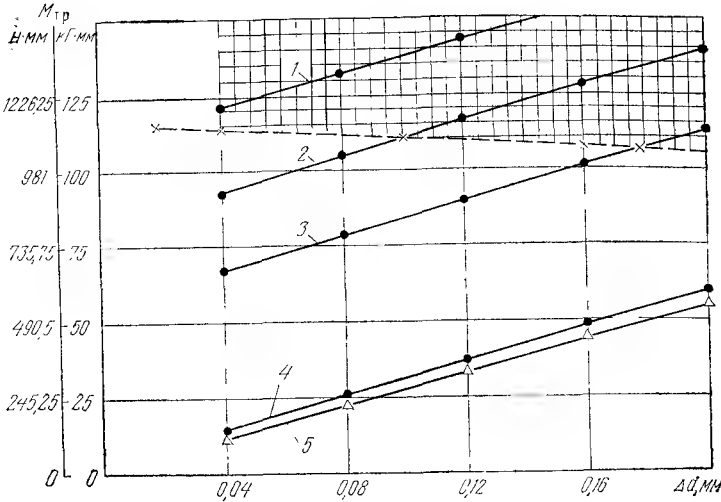


Рис. 33. Зависимость момента трения от зазора между доводимым отверстием и притиром при его износе, равном 0,02 мм, но различной толщине стенки: 1 — $M_{тр}=143+22,5 X_2 (h_{cp}=1,40)$; 2 — $(h_{cp}=1,25)$; 3 — $M_{тр}=90+22,5 X_2 (h_{cp}=1,05)$; 4 — $M_{тр}=37+22,5 X_2 (h_{cp}=0,70)$; 5 — $M_{тр}=258 \Delta d (h_{cp}=0,70)$

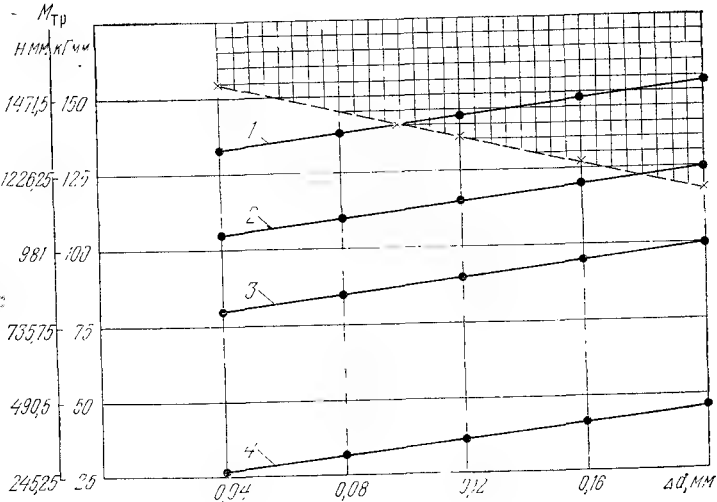


Рис. 34. Зависимость момента трения от зазора между доводимым отверстием и притиром при его износе, равном 0,1 мм, но различной толщине стенки: 1 — $M_{тр}=143+10,5 X_2 (h_{cp}=1,40)$; 2 — $(h_{cp}=1,25)$; 3 — $M_{тр}=90+10,5 X_2 (h_{cp}=1,05)$; 4 — $M_{тр}=37+10,5 X_2 (h_{cp}=0,70)$

Таблица 32

Общая таблица коэффициентов уравнений регрессии

Режим	Твердость	У	β_0		r_0		Δr		h_{cp}		K		b		δ	
			X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7						
Без смазки	HB 217	P_0	+28,7	-9,2	+5,4	+17,9	+0,1	+7,1	+0,8							
		$M_{тр}$	+60	-13,0	+11,0	+33,5	+3,5	+17,0	+1,0							
	HB 190	P_0	+24,6	-7,1	+4,7	+15,9	+1,4	+5,1	+0,5							
		$M_{тр}$	+53	-8,5	+8,0	+33	+4,0	+12,5	+6,0							
Смазка машинным маслом	HB 170	P_0	+20,0	-5,1	+3,6	+13,0	+0,6	+4,6	-0,1							
		$M_{тр}$	+44	-5,7	+7,2	+26,6	+3,8	+9,5	-0,94							
	HB 217	P_0	+25,8	-8,4	+5,1	+16,4	+0,16	+5,1	+0,23							
		$M_{тр}$	+51	-8,4	+9,1	+31,0	+3,1	+11,6	-1,9							
	HB 190	P_0	+21,8	-6,5	+4,1	+14,2	+0,7	+4,1	-0,5							
		$M_{тр}$	+43,5	-6,05	+7,15	+28	+4,2	+8,8	-0,8							
	HB 170	P_0	+18,5	-4,2	+3,3	+12,1	+1,65	+4,0	-0,27							
		$M_{тр}$	+40	-3,2	+7,7	+25,5	+5,2	+9,0	-0,9							

Продолжение табл. 32

Коэффициенты взаимодействия факторов

$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_1 X_4$	$X_1 X_5$	$X_1 X_6$	$X_2 X_3$	$X_2 X_4$	$X_2 X_5$	$X_2 X_6$	$X_3 X_4$	$X_3 X_5$	$X_3 X_6$	$X_4 X_5$	$X_4 X_6$	$X_5 X_6$
-2,0	-5,3	-1,9	-1,5	+1,3	+2,0	-1,1	+1,5	-2,3	-1,6	+5,3	-1,4	-1,5	+1,2	+0,8
-5,5	-7,0	+1,0	-3,5	+4,0	+3,0	-1,0	+3,0	-6,0	-3,0	+12,5	-4,0	+2,0	+4,0	+3,0
-2,0	-4,2	-1,4	+0,02	+0,6	+1,4	-0,4	-0,2	-2,8	+0,05	+3,9	-1,1	+0,3	+0,1	+0,3
-4,5	-4,0	+3,5	-2,5	+2,0	+3,0	-2,0	-0,04	-5,2	+1,1	+12,0	-2,6	+3,3	+1,65	+0,6
-1,1	-2,7	-0,8	-0,5	+0,8	+1,3	-0,3	-0,2	-2,1	-1,1	+2,6	-1,1	-0,2	-0,5	+0,06
-4,7	-2,1	+2,2	-1,6	+2,2	+2,8	-1,2	-0,2	-4,8	+0,35	+6,1	-2,5	+1,5	+2,7	-0,05
-2,2	-4,8	-0,6	+0,3	+1,7	+2,4	-1,65	+1,0	-2,9	-1,1	+3,5	-1,35	-0,12	+0,07	+0,8
-4,16	-4,15	+2,5	-2,0	+4,3	+4,1	-1,8	+1,9	-7,6	-0,55	+8,4	-5,0	+1,3	+0,4	+0,5
-1,5	-4,0	-0,27	-0,5	+1,1	+2,0	-0,17	+0,1	-2,7	+0,64	+2,7	-1,3	+0,5	+0,22	+0,2
-5,0	-2,1	+1,3	-1,5	+2,4	+3,5	-0,2	-0,1	-2,1	+1,8	+5,3	-2,6	+1,15	+1,05	+0,5
-1,0	-2,0	+0,56	+0,01	+1,2	+1,35	-0,17	-0,6	-2,1	+0,8	+2,8	-0,85	+0,65	-0,12	+0,26
-3,8	+0,4	+2,4	+0,8	+1,9	+4,2	+0,5	+0,2	-5,6	+2,6	+6,1	-2,2	+2,7	-0,3	+0,06

изношенного притира до контрольного размера производился на несколько большую величину, чем без износа. Это и обеспечивало получение P_0 и $M_{тр}$ на уровне тех же значений, что и без износа. При доводке отверстий диаметром 6 мм формулы (47), (48) принимают вид

$$P_0 = 37,9 + 7,4 X_2 + 23,2 X_3 + 1,9 X_4 + 7,1 X_5 + 2,0 X_2 X_3 - 2,3 X_2 X_6 + 5,3 X_3 X_5, \quad (49)$$

$$M_{тр} = 73 + 16,5 X_2 + 40,5 X_3 + 17 X_5 - 6,0 X_2 X_6 + 12,5 X_3 X_5. \quad (50)$$

На рис. 33 и 34 представлены зависимости момента трения $M_{тр}$ от толщины стенки притира $h_{ср}(X_3)$ и зазора между притиром и доводимым отверстием $\Delta r(X_2)$. Графики даны для чугуновых притиров длиной, равной 18 мм ($X_5 = +1$), изготовленных из СЧ 28-48, твердостью $HB\ 217$. Построены графики на основе формулы (50). На рис. 33 износ притира $\delta(X_6)$ принят равным 0,02 мм на радиус ($X_6 = -1$), а на рис. 34 — 0,1 мм на радиус ($X_6 = +1$). Для сравнения величины Δr с допустимым значением упругого разжима Δd_y на графиках значение Δr представлено в виде $\Delta d = 2\Delta r$.

На основе полученных выше данных о допустимом разжиге притира на рис. 33 и 34 заштрихованы области, в которых упругий разжим притира невозможен. Пользуясь полученными графиками, несложно решить, какова вероятность того, что притир толщиной стенки $h_{ср}$ при разжиге на величину Δd будет разрушен. Для практических целей необходимо использовать значения $h_{ср}$ и Δd только в незаштрихованной зоне.

На рис. 33 также приведена зависимость значений теоретического момента трения $M_{тр}$ от величины разжима Δd . График построен на основании расчета момента трения по формуле (45), в которой была произведена замена $\Delta S = 2\pi\Delta r = \pi\Delta d$. Формула получила вид

$$M_{тр} = \frac{2 \pi^2 E \Delta d b h_{ср}^3 f d_{ср}}{d (9 \pi d^2 + 4 h_{ср}^2)}. \quad (51)$$

Для расчета приняты следующие значения переменных: $b = 18$ мм; $E = 1,325 \cdot 10^4$ кг/мм²; $h_{ср} = 0,7 - 1,4$ мм; $d_{отв} = 6$ мм; $d = d_{отв} - h_{ср}$; $d_{ср} = d_{отв} - 2h_{ср}$. Коэффициент трения f принят равным 0,15. Сравнение полученных данных показывает, что расчетные значения $M_{тр}$ на 5—20% ниже экспериментальных. Занижение, очевидно, связано с тем, что принятое для расчетов значение коэффициента трения несколько меньше, чем существующее в реальных условиях, когда поверхность контакта двух деталей представляет собой коническую поверхность малой конусности.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АБРАЗИВНОЙ ДОВОДКИ И ПОЛИРОВАНИЯ

1. Разновидности доводочных станков и области их применения

Доводочные и полировальные станки относятся к восьмому и частично к девятому типу 3-й группы металлорежущих станков. Обозначения моделей этих станков, выпускаемых в нашей стране серийно, обычно начинаются с цифр 38 или 39 (например, 3803, 3813, 3820, 3927, 3940 и т. д.). Буква, следующая за цифрой 3, указывает на модернизацию этих станков (3А814, 3Б814, 3А816, 3Б816 и др.); буква, стоящая после всех цифр, обозначает модификацию (вариант) базовой модели этого станка (3804П, 3804К, 3Б816И, 3922Е и т. д.).

Некоторые серийные модели специальных и специализированных доводочных станков отечественного производства обозначают одной, двумя или большим числом букв, к которым добавляют цифры, указывающие порядковый номер модели станка (например, С-15, ОС-18А, ОФ-26А, РТ-57, СС-250, ВШ-318, СПШ-1, СППД-2 и др.). При этом в обозначении этих станков первые буквы часто указывают место изготовления модели. Так, например, некоторые доводочные станки, выпускаемые Одесским заводом фрезерных станков им. С. М. Кирова, имеют символ ОФ, Одесским заводом радиально-сверлильных станков — ОС, Витебским станкозаводом им. С. М. Кирова — ВШ, Витебским заводом заточных станков — ВЗ, Стерлитамакским станкостроительным заводом им. Ленина — СС, Рязанским станкозаводом — РТ, Майкопским станкозаводом им. М. Ф. Фрунзе — МФ, Ленинградским станкозаводом им. Ильича — ЛЗ и т. д., однако этого правила строго не придерживаются.

Опытные и экспериментальные станки и установки имеют еще большее разнообразие в обозначении, например, ПД-01, ПД-01М, ПД-04, ШПЗ-300, ШПЗ-500М, ЖК-14.02, ЖК-14.08, ЖК-14.09, ДПК-1, ПД2С-1, ПАВ-1, АСЗ-4, ДА-30, ДА-50, ДА-72, ДА-95, ДСВ-01С, ЛП-8861, АМДП-1, ДПШ-8, ВНИПП-35, В1МЗ, 385-125 ЦНИТА-ХТЗ и т. д.

Ряд станков, разработанных в Пермском политехническом институте, имеет обозначения: ИПД-6, ВДП-4М, ПДС-3, ПДС-5 и т. д. Опытные станки, разработанные в Челябинском политехническом институте под руководством проф. Ю. Г. Проскурякова, обозначены ЧПИ 63/37 и ЧПИ

65/36. Оригинальный доводочный станок П8-ТММ разработан П. Н. Орловым и В. А. Полухиным в МВТУ им. Н. Э. Баумана. Станок для доводки шариков конструкции 1ГПЗ имеет символ ШД-100. Станки конструкции 4ГПЗ названы моделями 23 и 57. Интересные автоматы типа ПР (ПР 378, ПР 379, ПР 431) разработаны в НИИ часовой промышленности.

Доводочные станки предназначены для тонкой финишной обработки деталей. При такой обработке с поверхности детали удаляется незначительный слой, оставленный при предшествующей обработке. Из всей группы доводочных станков наиболее широкое распространение получили станки для притирки, хонингования, суперфиниширования и специальные доводочные станки для тонкой обработки конкретных поверхностей (например, доводки шариков, колец подшипников и т. д.).

Доводочные станки по назначению, конструктивным особенностям и технологическому применению могут быть подразделены на различные виды. В зависимости от формы обрабатываемой поверхности доводочные станки подразделяются на станки для обработки плоских, наружных (цилиндрических, конических и сферических) поверхностей тел вращения, отверстий (цилиндрических, конических и фасонных — сквозных, глухих, ступенчатых и т. д.), шариков, резьб, зубчатых колес и других фасонных поверхностей. По количеству главных рабочих органов станки могут быть одно-, двух- и многошпиндельными; одно- и двух-дисковыми, а по расположению устройств в пространстве — с вертикальным или горизонтальным расположением оси вращения. По степени специализации доводочные станки можно подразделить на три группы: универсальные, специализированные и специальные.

Освоение и широкое применение в промышленности алмазов и других сверхтвердых материалов способствовало дальнейшему совершенствованию оборудования, особенно предназначенного для финишных операций. В последнее десятилетие в отечественном станкостроении модернизировано много существующих моделей и создан ряд новых станков, которые отвечают повышенным требованиям алмазной обработки. Однако следует отметить, что в разработке и изготовлении оборудования для алмазной обработки в настоящее время еще не установилась единая техническая политика. Это особенно относится к предприятиям, СКБ, НИИ оптико-механической, электронной, радиотехнической и другим машиностроительным отраслям промышленности, которые создают отдельные виды станков, учитывая лишь свои ведомственные потребности. Отмеченное особенно относится к обработке стекла, ферритов, полупроводников, кварца, ситаллов и других неметаллических материалов. Этим во многом и объясняется такое большое разнообразие опытных доводочных и полировальных станков.

Наиболее широкое распространение в промышленности получили доводочные станки для обработки плоскостей и наружных цилиндрических поверхностей.

2. Доводочные станки для обработки плоскостей и наружных цилиндрических поверхностей

Для доводки одной плоскости детали обычно используются однодисковые доводочные станки. До 1966 г. отечественная станкостроительная промышленность выпускала однодисковые доводочные станки только двух моделей: СППД-2 и 3804. На плоскодоводочном станке СППД-2 (рис. 35) можно доводить плоскости диаметром до 250 мм или поверхности размером до 175×175 мм и высотой до 20 мм. Станок полуавтоматического типа с непрерывным циклом обработки. В качестве абразивной

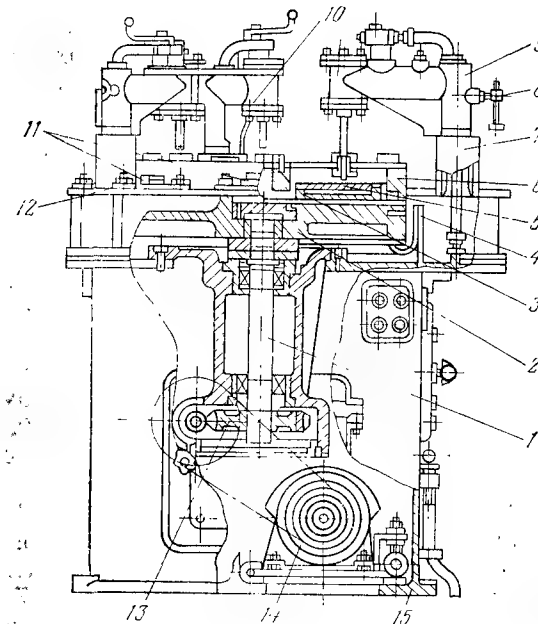


Рис. 35. Плоскостоводочный станок СППД-2

среды на нем используется в основном консистентная паста. Расположенный в горизонтальной плоскости чугунный дисковый притир 2 (наружный диаметр 750 мм) закреплен на шпинделе 1. Шпиндель вращается со скоростью 30 или 50 об/мин (3,15 или 5,25 рад/сек). Для установки деталей на притире используют три сепаратора, которые изготовлены из листовой стали или текстолита и расположены свободно внутри трех правящих колец 6. Наружный диаметр сепаратора на 1,5—2 мм меньше внутреннего диаметра правильного кольца. Правящие кольца используются для непрерывной правки рабочей поверхности притира во время доводки. Рабочее давление в зоне доводки не нормировано и создается за счет веса деталей, а также дополнительного груза 5.

Необходимая плоскостность притира достигается смещением колец. Величина смещения может быть до 25 мм. Направление смещения зави-

сит от характера износа притира. В случае выпуклости правильные кольца сдвигают к центру, а при вогнутости — от центра. Установленное положение кольца поддерживается двумя роликами 11, смонтированным на плите 12. Подъем, опускание и поджим колец к притиру производятся с помощью пневмоцилиндров 10, закрепленных на кронштейне 9. Кронштейн стопорится на колонне 7 с помощью винта 8. При повороте кронштейна вместе с ним отводятся в сторону и правильные кольца, обеспечивая свободный доступ к рабочей поверхности притира. Вращение притиру передается от электродвигателя 14 мощностью 2,8 кВт через клиноременную передачу и червячный редуктор 13, которые смонтированы внутри станины 15. Для сбора отходов служит поддон 4. Продолжительность доводки устанавливается с помощью реле времени. Станок позволяет получать плоскостность обрабатываемых поверхностей до 1 мкм.

В последнее десятилетие в отечественном станкостроении произошли существенные изменения. Станкостроение развивается быстрыми темпами за счет увеличения общего выпуска станков, разработки, освоения и производства уникальных станков, автоматов и полуавтоматов и резкого повышения их точности. Возросло производство высокоточных станков, предназначенных для финишных операций, существенно расширена номенклатура по доводочным и полировальным станкам, особенно по однодисковым доводочным. Начали выпускаться доводочные станки 3804П, 3806, 3807, 3808 с диаметром доводочных дисков соответственно 450, 710, 1120 и 1600 мм. Изготавливаются эти станки Каунасским заводом шлифовальных станков «Нерис». Ведутся работы по созданию однодисковых доводочных станков с еще большим диаметром доводочного диска. Одновременно увеличилось и число моделей двухдисковых вертикально-доводочных станков. Вместо ранее выпускавшихся четырех моделей (3А814, 3Б816, МШ-156 и МШ-178) освоен выпуск ряда новых моделей: 3814Б, 3814П, 3816П, 3Б816И, 3Д816, 3817 и др. В последнее время разработана новая базовая модель двухдискового доводочного станка 3813, которая имеет ряд оригинальных конструктивных решений (узлов), готовится к «запуску» в производство мод. 3Д817. Двухдисковые станки предназначены для двусторонней доводки плоскопараллельных поверхностей типа концевых мер длины или цилиндрических деталей. Их целесообразно использовать при доводке больших партий однотипных деталей.

При доводке небольших партий деталей однодисковые доводочные станки имеют некоторые преимущества. В машиностроении большая часть деталей должна притираться только по одной поверхности. Для таких деталей однодисковые станки целесообразнее. Кроме того, диски-притиры двухдисковых станков через определенные промежутки времени необходимо снимать и править, у однодисковых станков правка осуществляется в процессе доводки.

Доводочные станки 3803, 3804П, 3806, 3807, 3808 предназначены для повышения класса шероховатости, плоскостности и параллельности поверхности. Как правило, на этих станках обрабатываются детали, у которых доводке подвергается одна плоская поверхность. На станках можно обрабатывать изделия из различных материалов: стальные, чугунные,

бронзовые, керамические, пластмассовые, полупроводниковые и др. На данных станках так же, как и на СППД-2, доводимые детали размещаются внутри правильных колец в сепараторах. Однако в отличие от станка СППД-2 в этих моделях в качестве абразивной среды используется главным образом суспензия. Для мерной подачи абразивной суспензии станки снабжены дозирующими устройствами. Основные технические данные наиболее распространенных однодисковых доводочных станков приведены в табл. 33. Выбор модели станка зависит от размеров и веса обрабатываемых деталей, типа производства.

Для деталей, диаметр которых не превышает 150 мм, может быть использован станок 3804П (рис. 36). На этом станке доводочный диск 12, жестко закрепленный на планшайбе шпинделя 5, приводится в движение от электродвигателя 3 через клиноременную передачу и червячный редуктор 4. Для натяжения клиноременной передачи электродвигатель установлен на качающейся плите. Сменные шкивы 1 и 2 обеспечивают доводочному диску три скорости вращения. За счет разности скоростей в центре и периферии притира правящие кольца 10 получают вращение вокруг своих осей. От перемещения вместе с доводочным диском каждое кольцо удерживается парой роликов 9, закрепленных на кронштейне 3. Кронштейны, смонтированные на вспомогательном столе 7, могут поворачиваться вокруг вертикальной оси, при этом ролики вместе с кольцом получают радиальное перемещение по поверхности доводочного диска. Установочное вертикальное перемещение вспомогательного стола произ-

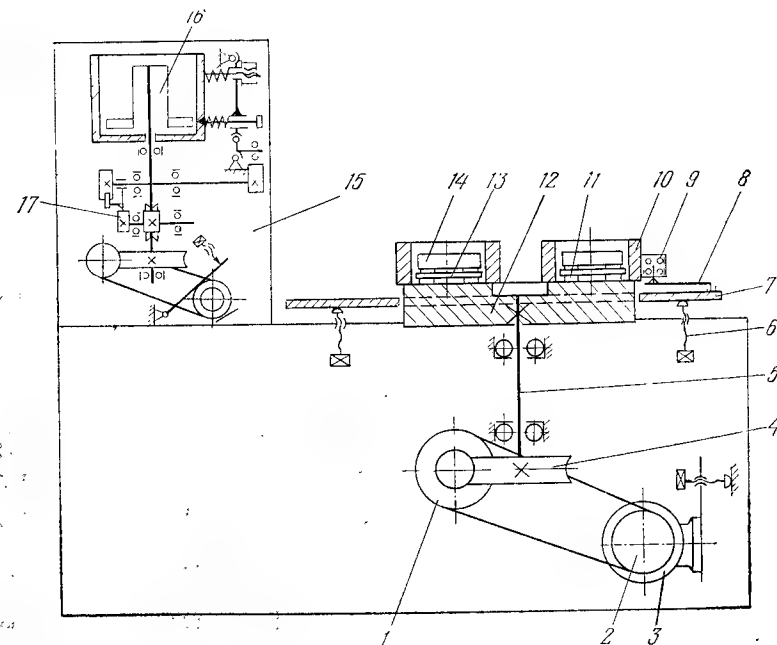


Рис. 36. Кинематическая схема станка модели 3804П

Основные техничекие данные наиболее

Параметры	Модели		
	3803	3804	3804П
Размеры обрабатываемых поверхностей, мм:			
круглого сечения	100	120	150
квадратного сечения	70×70	85×85	105×105
Диаметр диска-притира, мм:			
наружный	280	360	450
внутренний	52	115	100
Ширина рабочего кольца, мм	114	122	175
Число правящих колец	3	3	3
Размеры правящих колец, мм:			
наружный диаметр	128	160	200
внутренний диаметр	100	120	150
высота	70	80	100
Радиальное смещение правильных колец, мм	±7	±20	±12,5
Число оборотов притира, об/мин (рад/сек)	71(7,455) 144(15,12)	40(4,2) 60(6,3)	31(3,255) 54(5,670) 95(9,975)
Удельное давление правящего кольца, кг/см ² (кн/м ²)	0,06(5,886)	0,06(5,886)	0,08(7,848)
Удельное давление обрабатываемой детали на притир, кг/см ² (кн/м ²)	Не нормировано		
Способ прижима изделия к притиру	Накладными грузами		
Рекомендуемое удельное давление на притир при доводке с грузами, кг/см ² (кн/м ²)	0,06—0,12 (5,886—11,772)	0,06—0,12 (5,886—11,772)	0,1—0,15 (9,81—14,715)
Высота подъема прижимного диска, мм	Нет	Нет	Нет
Способ подачи абразива в зону доводки	Дозированная суспензия	Дозированная суспензия	Дозированная суспензия
Неплоскостность обрабатываемой поверхности:			
отклонения, мм	0,001	0,001	0,001
на диаметре, мм	50	50	50
класс шероховатости поверхности	11-й	11-й	11-й
Мощность двигателя привода диска-притира, кВт	0,4	1	0,6
Габариты станка, мм:			
длина	700	860	1030
ширина	450	550	715
высота	785	890	1335
Вес станка, кг	180	250	1000

распространенных однодисковых плоскодоводочных станков

Таблица 33

станков					
	СППД-2	3806	3807	3808	3806Л
	250 175×175	250 175×175	360 252×252	500 350×350	250 175×175
	750 25	710 150	1120 320	1600 500	710 150
	362 3	280 3	400 4	550 4	280 3
	330 200 100	310 250 140	440 330 155	620 500 160	310 250 150
	±25 30(3,15) 50(5,25)	±15 21(2,205) 35(3,675) 72(7,560)	±40 38(4,08)	±20 29(3,045)	±15 21(2,205) 35(3,675) 72(7,560)
	0,08(7,848)	0,1(9,81) 0,1—0,2 (9,81—19,62)	0,1(9,81) 0,1—0,2 (9,81—19,62)	0,1(9,81) 0,1—0,2 (9,81—19,62)	0,13(12,753) 0,1—0,2 (9,81—19,62)
	0,1—0,2 (9,81—19,62)	Механический и электромагнитный прижим	Механический и электромагнитный прижим	Механический и электромагнитный прижим	Пневматический и электромагнитный прижим
	0,1—0,2 (9,81—19,62)	—	—	—	—
	Паста или суспензия	340 Дозированная суспензия	200 Непрерывная суспензия	200 Непрерывная суспензия	340 Дозированная суспензия
	0,001 50 11-й	0,001 50 10-й	0,002 120 11-й	0,003 200 11-й	0,001 50 10-й
	2,8	2,2	7,5	18	2,2
	1450 1070 1230 1200	1470 1200 2480 1770	2260 1650 2390 7300	2725 1920 2540 11000	1495 1220 2010 2300

водится с помощью винтов 6. Внутри правящих колец вставляются сепараторы 13 с деталями 11. Поджим деталей к поверхности доводочного диска производится с помощью сменных грузов 14. Станок имеет дозирующее устройство 15 для мерной подачи абразивной суспензии. В устройстве применен привод кулачкового типа 17. Вал эксцентрика вращается со скоростью 11 об/мин (1,155 рад/сек). Абразивная суспензия в процессе доводки подается периодически. Время цикла устанавливается с помощью реле времени и может составлять 6; 3; 2; 1,5; 1,2 мин.

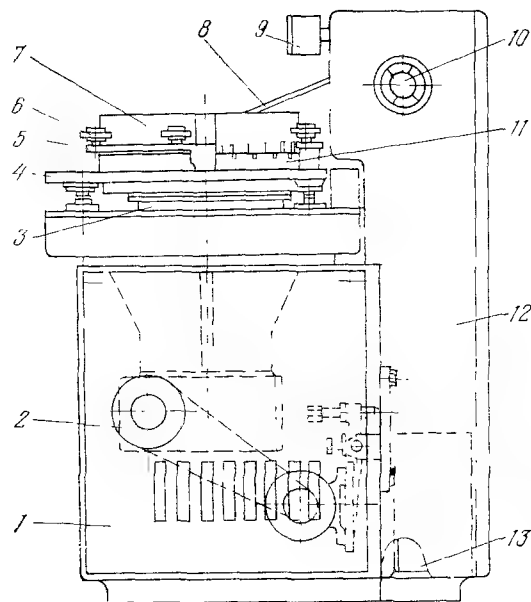


Рис. 37. Общий вид однодискового плосководочного станка 3804П: 1 — станина; 2 — червячный редуктор; 3 — планшайба; 4 — вспомогательный стол; 5 — роликовый кроштейн; 6 — ролики; 7 — правящее кольцо; 8 — подвод абразивной суспензии; 9 — пульт управления; 10 — реле времени; 11 — доводочный диск; 12 — стойка; 13 — бак для сбора суспензии

Суспензия в процессе работы непрерывно перемешивается лопастным смесителем 16. Отработанная суспензия вместе с отходами обработки стекает по наклонным пазам доводочного диска и далее поступает в специальный бак.

Общий вид станка и расположение основных узлов на станине станка показаны на рис. 37. К станине крепится специальная стойка, состоящая из трех отсеков, расположенных один над другим. В нижнем отсеке находится бак для сбора отработанной суспензии. На крышке бака укреплены центробежный насос производительностью 45 л/мин с электродвигателем 0,18 кВт, магнитный и сетчатый фильтры для очистки суспензии. Все это обеспечивает получение притираемой поверхности с высоким классом шероховатости. В центральном отсеке смонтирован шкаф элект-

троборудования. Устройство для дозированной подачи суспензии занимает верхнюю часть стойки. На передней стенке стойки находится пульт управления станком.

В рассмотренном плосководочном станке, так же как и в некоторых других (табл. 33), прижим изделия к притиру осуществляется накладными грузами. Подобный способ применяется и в ряде зарубежных станков. Из станков зарубежных фирм по этому принципу работают FL-3 фирмы «Peter Wolters»; 4R40, 4R70, 4R100, 4R150/53, 4R214/82, 3R214/89, 3R290/120, 3R365/150, 3R500/200 фирмы «Waldrich Coburg»; Lapmaster 12, 14 и 36 фирмы «Crope Packing Co»; Lapmaster 24 фирмы «Paune Product International»; 12A, 14A, 30A фирмы «Flexibox» и др.

Удельное давление обрабатываемой детали на притир в рассмотренных плосководочных станках не нормировано. Для устранения отмеченного недостатка Ленинградским особым конструкторским бюро автоматов и револьверных станков (ЛенОКБ АРС) разработана гамма станков с прижимными устройствами (3806, 3807, 3808 и др.). На этих станках прижим деталей к притиру может производиться двумя способами: механическим и электромагнитным. На станке 3806Л, кроме электромагнитного, применен способ прижима деталей и пневматический.

Вторую группу плосководочных станков образуют двухдисковые. Эти станки снабжены двумя дисками-притирами: верхним и нижним. В зависимости от назначения в двухдисковых плосководочных станках оба притира мо-

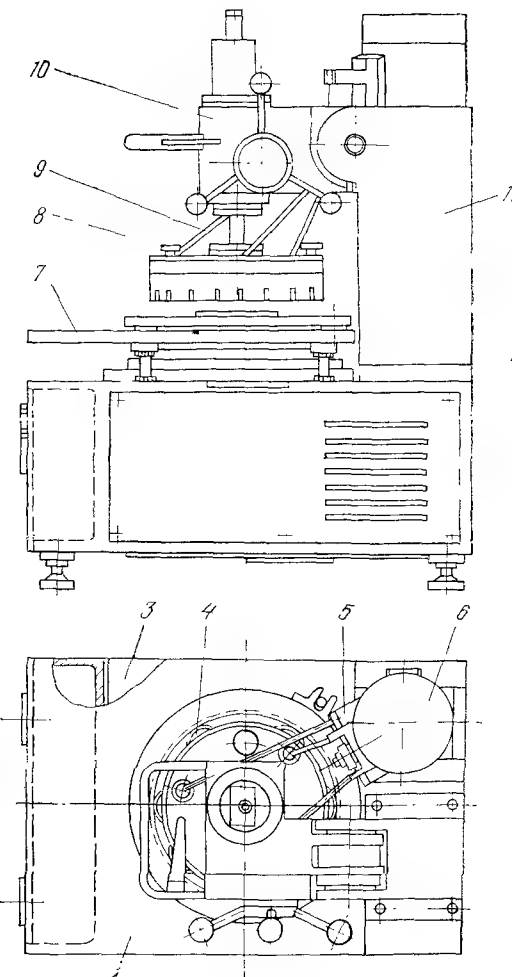


Рис. 38. Общий вид двухдискового плосководочного станка 3813Б: 1 — станина; 2 — пульт управления; 3 — бак для сбора отработанной суспензии; 4 — планетарная наладка; 5 — дозатор; 6 — смеситель; 7 — вспомогательный стол; 8 — регулировочные винты; 9 — подвод суспензии; 10 — поворотная (откидная) часть консоли; 11 — неподвижная часть консоли

Основные технические данные выпускаемых в настоящее время двухдисковых

Параметры	Модели		
	3813	3813Б	3813Е
Диаметры обрабатываемых поверхностей, мм:			
плоских	До 60	До 60	До 50
круглых	До 20	1,5—30	До 30
Размеры дисков-притиров, мм:			
наружный	280	280	280
внутренний	160	160	140
толщина	40	40	45
Ширина рабочего кольца, мм	60	60	70
Наибольшее расстояние между новыми притирами, мм	30	30	32
Число оборотов в 1 мин дисков-притиров (направление):			
нижнего	73(7,665) 145(15,225)	Неподвижен	34—100 (3,57—10,5)
верхнего (попутное)	Нет	Нет	31,5—93 (3,3075—9,765)
(встречное)	»	»	38—113 (3,99—11,865)
Число оборотов в 1 мин сепаратора или эксцентрика	54(5,67) 105(11,025)	5,5(0,5775) 11(1,155) сепаратора 18,5(1,9425) 37(3,885) эксцентрика	15—60 (1,575—6,3)
Вылет оси диска-притира от стойки станка, мм	215	190	350
Отвод верхнего притира в сторону	Ручной	Ручной (назад)	Ручной
Диапазон изменения эксцентриситета, мм	0—6	0—10	0—10
Диапазон регулирования реле времени, мин	0—60	0—60	0—15
Ход пиноли, мм	75	75	75
Усилие прижима деталей, кг(н)	0—40 (0—392,4)	0—40 (0—392,4)	5—50 (49,05—490,5)
Качество обработки плоских поверхностей:			
параллельность торцов, мм	0,002	0,001	0,0005
на диаметре, мм	50	50	50
класс шероховатости	11-й	10в	10-й
Точность обработки цилиндрических поверхностей:			
овальность, мм	0,0008	—	0,0006
на диаметре и длине, мм	8×60	—	30×60
конусность, мм	0,0008	—	0,0012
на диаметре и длине, мм	8×60	—	30×60
класс шероховатости	11-й	—	11-й

плосковододочных станков

СТАНКОВ									
3814Б		3Б814		3814П		3816П		3817	
		15—115 3—50		До 100 4—50		До 140 5—95		100—320 15—110	
450		450		450		700		1100	
190		220		220		420		400	
75		75		65		83		130	
127,5		115		115		140		350	
260		65		70		140		150	
Неподвижен		41,5(4,3575)		45—115		30—99		20,5(2,1525)	
Нет		81(8,505)		(4,725—12,075)		(3,15—10,395)		40,8(4,284)	
		Нет		41—105		26—88		18,3(1,9215)	
				(4,305—11,025)		(2,73—9,24)		36,4(3,822)	
		»		51—130		33—130		22(2,31)	
				(5,355—13,65)		(3,465—11,34)		44(4,62)	
2,44(0,2562) сепаратора		2,48—54,6		14—50		10—35		7—23	
31(3,255) эксцентрика		(0,2604—5,733)		(1,47—5,25)		(1,05—3,675)		(0,735—2,415)	
540		305						От оси 1000	
От пневмоцилиндра		Ручной		Ручной		Ручной		От гидроприода	
		0—20						0—30	
		0—15							
150		150		140		200		250	
0—150		0—160		15—150		50—400		200—1000	
(0—1471,5)		(0—1569,6)		(147,15—1471,5)		(490,5—3924)		(1962—9810)	
0,0003		0,0025		0,007		0,002		0,003	
50		50		50		120		320	
116		10-й		11-й		11-й		10-й	
—		0,0016		0,001		0,0015		0,002	
—		30×70		5×30		5×30		15×50	
—		0,0016		0,002		0,002		0,002	
—		30×70		5×30		5×30		15×50	
—		11-й		11-й		11-й		11-й	

Параметры	Модели		
	3813	3813Б	3813Е
Мощность электродвигателя главного движения, <i>квт</i>	0,37	0,4	1,5
Габаритные размеры, <i>мм</i> :			
длина	700	700	1140
ширина	454	454	930
высота	1060	985	1770
Вес, <i>кг</i>	205	230	1400

гут быть неподвижными или один вращается, а второй неподвижен, или оба вращаются. В последнем случае один из притиров имеет попутное, встречное или оба движения. У большинства моделей этих станков верхний притир крепится к пиноли с помощью шарнира, что позволяет ему самоустанавливаться по деталям и нижнему притиру. При таком креплении верхний притир может свободно вращаться за счет фрикционных связей с обрабатываемыми деталями, а при необходимости он стопорится. Станки с вращающимися притирами практически непригодны для двусторонней доводки плоскостей высокоточных деталей. В этом случае используются станки с неподвижными притирами.

На базе существующих моделей отечественным станкостроением в последнее время разработан и освоен выпуск нескольких модификаций двухдисковых станков с неподвижными притирами. К ним относятся мод. 3813Б, 3814Б и др. Общий вид и кинематическая схема станка мод. 3813Б показаны на рис. 38 и 39. Станина станка представляет собой жесткую отливку коробчатой формы, состоящую из трех отсеков. Внутри основного отсека расположены редуктор, электродвигатель, сменные шкивы и привод дозатора. В переднем отсеке размещается электрооборудование. Ниша переднего отсека закрыта пультом управления. В боковом отсеке находится бак для сбора отработанной суспензии. На задней стенке станины смонтирован механизм отключения привода дозатора, на верхней установлены дозатор, консоль и вспомогательный стол. В верхней стенке корпуса имеется отверстие для планшайбы, на которую крепится нижний доводочный диск. Консоль станка состоит из подвижной и неподвижной частей. Внутри неподвижной части закреплена регулируемая пружина, облегчающая подъем поворотной части консоли. Поворотная часть состоит из червячно-реечной передачи, динамометра, индикатора, шарнира и верхнего притира. Верхний притир не имеет привода, он подвешен шарнирно на штоке и вращается лишь под действием сил трения, возникающих между ним и обрабатываемыми деталями.

На станке применена оригинальная конструкция динамометра. Основными элементами динамометра являются пиноль и подпружиненный шток. С помощью пиноли производится перемещение верхнего притира в вертикальном направлении. Подъем и опускание пиноли осуществляются вручную от маховика через червячно-реечную передачу. Фиксация пиноли в требуемом положении производится за счет самотормо-

станков	3814Б	3814	3814П	3816П	3817
	1,5	1,1	4	6	11,5
	1500	1100	1600	1805	2440
	1060	1035	1090	2017	2090
	2000	2190	1900	2025	2500
	2100	1250	2500	4300	8900

зящейся червячной пары. Удельное давление на обрабатываемые детали создается за счет деформации пружины динамометра. Пружина может работать в двух режимах: растяжения и сжатия. Один конец этой пружины крепится к нижней части пиноли, а второй — к штоку. При перемещении пиноли вниз пружина растягивается, вызывая перемещение штока и создавая необходимое удельное давление. Усилие растянутой

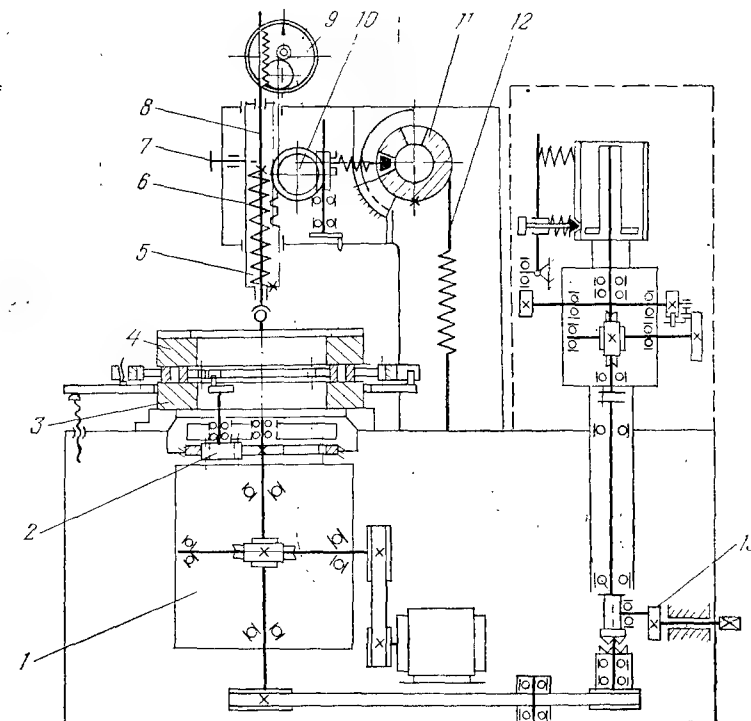


Рис. 39. Кинематическая схема станка мод. 3813Б: 1 — редуктор; 2 — планетарный механизм; 3 — нижний диск-притир; 4 — верхний диск-притир; 5 — пиноль; 6 — пружина динамометра; 7 — пружинный стопорный механизм поворота консоли; 8 — шток; 9 — индикатор; 10 — червячно-реечная передача; 11 — шарнир; 12 — пружина подъема поворотной части консоли; 13 — механизм отключения привода дозатора

пружины направлено вниз и суммируется с весом верхнего притира, штока и других подвижных частей. Перемещение штока регистрируется индикатором, шкала которого протарирована в давлении. При перемещении пиноли вверх пружина сжимается. Ее усилие в этом случае направлено вверх, что вызывает уменьшение рабочего давления. Поворотная часть консоли соединена с неподвижной частью горизонтальной осью. Фиксация угла поворота осуществляется пружинным стопорным механизмом.

На станке можно осуществить несколько вариантов наладок (рис. 40). Основные технические данные описанного и других двухдисковых

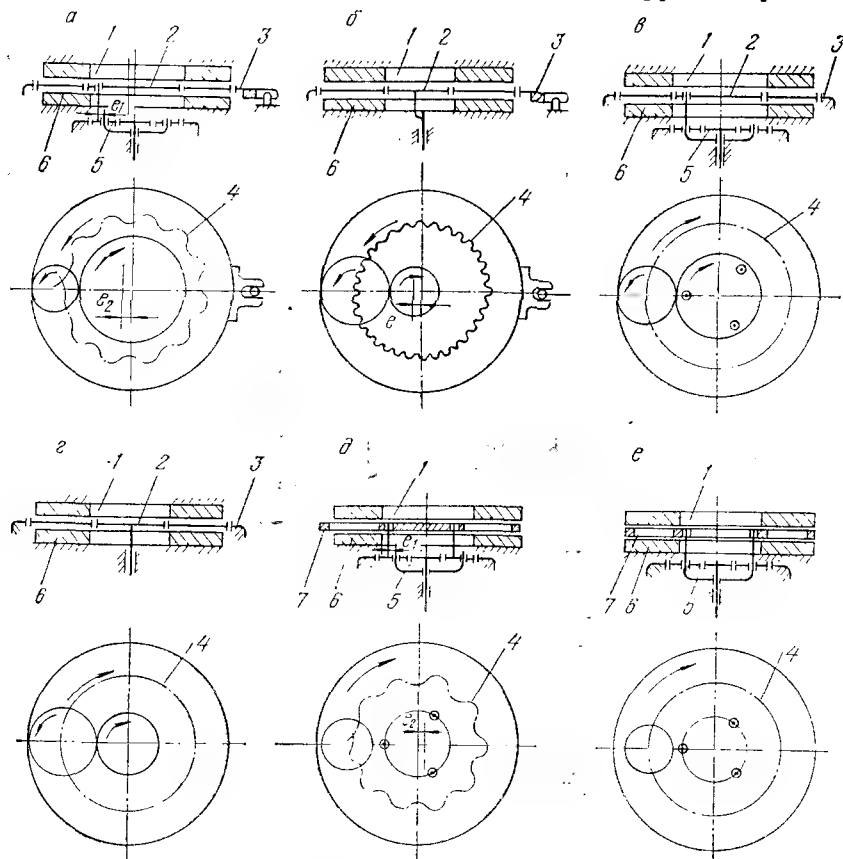


Рис. 40. Схемы наладок станка модели 3813Б и траектории движения устройств, несущих обрабатываемые изделия; а, б — планетарная наладка с цевочным зацеплением наружного зубчатого колеса; в, г — планетарная наладка с неподвижным наружным зубчатым колесом; д, е — сепараторная наладка; 1 — верхний притир; 2 — центральное зубчатое колесо планетарной наладки; 3 — наружное зубчатое колесо планетарной наладки; 4 — траектория движения центра круглой детали или устройства, несущего обрабатываемые детали; 5 — планетарный механизм; 6 — нижний притир; 7 — сепаратор; e_1 и e_2 — эксцентриситеты соответственно привода от центрального вала, эксцентрика водила и расположения центрального зубчатого колеса при планетарной наладке

плоскодоводочных станков, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 34. Двухдисковые станки с неподвижными притирами непригодны для доводки цилиндрических деталей. Более универсальными (хотя и менее точными) являются двухдисковые доводочные станки с вращающимися притирами. На них могут обрабатываться как плоские, так и цилиндрические детали. К таким станкам относятся 3813, 3813Е, 3А814, 3Б814, 3814П, 3816, 3816П, 3817 и др.

Вращательное движение на этих станках совершает либо только нижний, либо сразу оба притира. Оба притира на станке 3816 вращаются от одного электродвигателя. Внутри нижнего диска расположен эксцентрик, на палец которого насаживается сепаратор. Эксцентрик вращается от привода вращения нижнего диска-притира, при этом

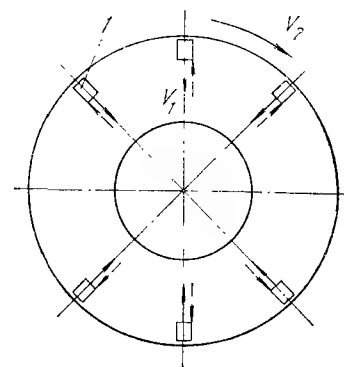


Рис. 41. Принципиальная схема доводочного станка ЧПИ 63/37: 1 — деталь

сепаратор вместе с расположенными в нем деталями совершает колебательные перемещения. Верхний притир имеет шарнирное крепление. Дополнительное давление стороны верхнего диска обеспечивается при помощи двух гидроцилиндров.

Лучшими из зарубежных станков этого типа являются станки фирм «Нортон» (США), «Ган и Кольб» и «Петер Вольтерс» (ФРГ). Станок мод. 2U8 («Петер Вольтерс») отличается от 3816 тем, что привод нижнего и верхнего притиров его осуществляется от разных двигателей одинаковой мощности. Для опускания и подъема верхнего диска используется отдельный электродвигатель. В этом станке отсутствует гидравлическая система, регулирующая давление верхнего притира на обрабатываемые детали. Для того чтобы уменьшить удельное давление верхнего диска на детали, в станке имеется специальное разгрузочное устройство. Для двусторонней плоскопараллельной доводки особо точных деталей (например, плоскопараллельных концевых мер длины) применяется ряд станков. К ним следует отнести прежде всего станок конструкции В. Д. Семенова. При доводке деталей на этом станке последние помещаются в гнезда сепараторных лент, проходящих между двумя неподвижными притирами-плитами размером 300×300 мм. Верхний притир имеет три степени свободы. Рабочее движение деталей в зазоре между притирами сложно. Оно состоит из двух возвратно-поступательных перемещений во взаимно перпендикулярных направлениях. Кроме станка В. Д. Семенова, для доводки таких деталей могут быть использованы станки и с круглыми притирами.

Один из станков этой группы — ЧПИ 63/37, изготовленный Челябинским политехническим институтом [55]. Принципиальная схема работы станка представлена на рис. 41. В отличие от рассмотренных выше стан-

ков главное движение здесь — возвратно-поступательное радиальное перемещение деталей со скоростью V_1 . Уравновешивание сил трения достигается в результате сообщения всем деталям одновременного движения от периферии к центру со скоростью V_1 . Движением подачи является вращательное движение со скоростью $V_2 = 2 \text{ м/мин}$, при этом скорость $V_1 > V_2$. При одновременном движении от периферии к центру все детали находятся в одинаковых условиях. Направление штрихов обработки в течение одного двойного хода деталей постоянно изменяется, что обеспечивает высокий класс шероховатости обработанной поверхности.

3. Доводочные станки для обработки отверстий

Для доводки отверстий применяются вертикально-доводочные станки ОФ-16, ОФ-20, ОФ-26, ОФ-38, ОФ-61 и т. д. Основной недостаток станков первых трех моделей — отсутствие автоматического разжима притира, а также компенсации его износа.

В ЦНИТА для устранения отмеченных недостатков проведена модернизация станка ОФ-26. На модернизированном станке процесс разжима притира осуществляется с использованием специального устройства с автономной гидравлической системой [66].

Наиболее близок по конструкции к модернизированному ОФ-26А станок 3820Д (рис. 42), разработанный Одесским СКБ специальных станков. В настоящее время из серийных моделей этот станок является наиболее современной отечественной моделью данного типа. Он предназначен для доводки отверстий диаметром 8—12 мм и длиной до 80 мм. На станке предусмотрены одновременные вращательное и возвратно-поступательное движения инструмента-притира, а также его разжим, обеспечивающий ступенчатое увеличение диаметра притира в процессе доводки. Вращение притиру передается от электродвигателя через шпиндельную коробку скоростей с трехступенчатым редуктором.

На станке имеются две самостоятельные гидравлические системы, одна из которых приводит в возвратно-поступательное движение шпиндельную головку, а вторая выполняет автоматический разжим притира во время доводки. Первая гидросистема состоит из лопастного насоса, дросселя, реверсивного золотника и дифференциального гидроцилиндра, который обеспечивает оди-

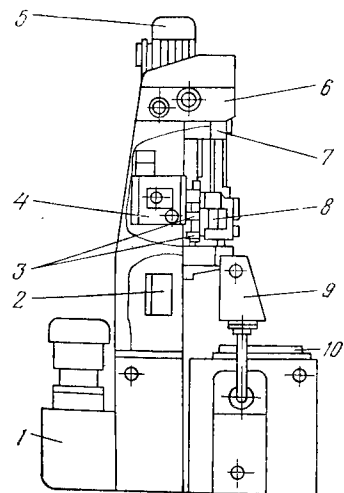


Рис. 42. Вертикальный доводочный станок 3820Д: 1 — насосная установка; 2 — гидронаносная панель разжима притира; 3 — кулачки управления; 4 — панель управления; 5 — электродвигатель шпинделя; 6 — коробка скоростей; 7 — гидросистема возвратно-поступательного перемещения шпинделя; 8 — шпиндельная головка; 9 — пульт управления; 10 — стол станка

наковую скорость движения шпиндельной головке вверх и вниз. Управление работой этой системы осуществляется от кулачков, расположенных на шпиндельной головке.

Гидросистема разжима притира включает насос, золотник, клапан, дросселем и гидроцилиндр. Доводка деталей на станке осуществляется по полуавтоматическому циклу. Весь цикл разжима притира состоит из четырех этапов. На первом этапе происходит быстрый подвод притира к обрабатываемой поверхности, на втором осуществляется ступенчатый разжим притира. При этом доводочная оправка-игла, расположенная внутри шпинделя, на каждый двойной ход шпиндельной головки перемещается вниз на определенное, заранее заданное расстояние. Третий этап предусматривает проведение процесса выхаживания без разжима притира. На четвертом этапе доводочной оправке-игле придается перемещение вверх и притир сжимается. Необходимо отметить, что обратная связь между разжимом притира и процессом доводки здесь отсутствует, поэтому для устойчивой работы (для предотвращения заклинивания притира в отверстии) необходимо величину подачи устанавливать опытным путем. Ее подбирают на основе следующей зависимости [66]:

$$S < \Delta_{\text{дет}} + \gamma_{\text{пр}}, \quad (52)$$

где S — подача (разжим притира) за один двойной ход шпиндельной головки, мм; $\Delta_{\text{дет}}$ — съем металла с детали, мм/дв.ход; $\gamma_{\text{пр}}$ — износ притира, мм/дв.ход.

Среди зарубежных станков для доводки отверстий заслуживает внимания двухшпиндельный вертикально-доводочный станок фирмы «Петер Вольтерс» мод. 2JLI, который отличается от приведенных выше тем, что имеет специальное устройство для автоматического подбива притира по мере его износа в процессе доводки. Подбив притира осуществляется в зависимости от крутящего момента, возникающего в процессе доводки.

Большие трудности представляет собой доводка глухих отверстий. Одним из наиболее распространенных отечественных серийных станков, на котором можно обрабатывать глухие отверстия, является станок мод. ОФ-61А. Его основные параметры приведены в табл. 35.

Большинство внутридоводочных станков для доводки точных отверстий, особенно глухих, являются специальными. В качестве примера можно привести отверстие в корпусе распылителя топливной аппаратуры. Для доводки отверстий в корпусе распылителя известен ряд конструкций станков.

В ЦНИТА разработан одношпиндельный вертикально-доводочный станок СП-31. В основу его положена известная конструкция подобного станка фирмы «Моторпал» (ЧССР). На этом станке деталь устанавливается в специальном приспособлении и получает вращательное движение. Притир имеет возвратно-поступательное перемещение. Разжим его осуществляется вручную при помощи специального патрона. При возрастании осевого усилия резания до определенной величины разжим прекращают. О необходимости прекращения разжима сигнализирует специальное устройство. Экспериментально установлены следующие опти-

Таблица 35

Основные технические данные некоторых моделей отечественных вертикальных притирочных станков для доводки отверстий

Параметры	Модели станков		
	ОФ-61А	3820-Д	3821-Д
Диаметр обрабатываемых отверстий, мм	8,5—15	До 12	До 30
Наибольшая длина обрабатываемых отверстий, мм	220	80	100
Тип притира	Стержень	Стержень	Стержень
Число оборотов шпинделя, об/мин	200; 318; 500; 800	200; 315; 500	200—400
Скорость возвратно-поступательного движения шпиндельной головки, м/мин	0—12	0—16	0—16
Наибольшее расстояние от нижнего торца шпинделя до стола, мм	431,5	485	760
Наибольший ход шпиндельной головки, мм	275	200	320
Величина ступенчатой подачи при разжиме притира за один двойной ход, мм	0—0,015	0—0,056	0—0,07
Мощность электродвигателя главного движения, кВт	1,7	0,6	1,1
Вылет шпинделя, мм	220	140	180
Размеры стола, мм	∅ 400	355×450	525×475
Точность обработки, мкм;			
овальность	3	1	1,5
конусность	5	1,5	2,5
Класс шероховатости обработанной поверхности	10—11-й	До 12-го	До 12-го
Габариты станка, мм:			
длина	1845	1100	1310
ширина	1220	630	770
высота	2228	2020	2400
Вес станка, кг	1430	1050	1400

мальные условия работы станка: $V_{\text{окр}}=14,9$ м/мин, $V_{\text{в.п}}=3,66$ м/мин, осевое усилие резания не более 8 кг (78,48 н). Если осевое усилие превышает это значение, то возможно заклинивание притира в отверстии.

Кроме станка СП-31, известен трехшпиндельный станок РЦ-81/5, разработанный фирмой «Моторпал». Отличие станка РЦ-81/5 от СП-31 заключается в механизме разжима притира. На станке имеется система автоматического регулирования с обратной связью между размером притира и значением осевого усилия резания. При доводке деталь вращается, а притир осуществляет возвратно-поступательные перемещения. При каждом двойном ходе притира специальное устройство при помощи упора, копира и храпового колеса перемещает оправку вверх и происходит

разжим притира. Возвратно-поступательные перемещения притира осуществляются при помощи кривошипного механизма, в котором в качестве шатуна использовано специальное пружинное телескопическое устройство. Конструкция устройства довольно проста. Схематически оно подобно цилиндру, внутри которого в средней части жестко закреплен «поршень». С двух сторон такого «поршня» имеются стержни, один из них жестко скреплен с «поршнем», а второй с буртиком прижимается к «поршню» с помощью сжатой пружины. На буртике закреплен упор, который через паз в цилиндре выведен наружу. Упор нажимает на контакты электроконтактного выключателя и держит их разомкнутыми. Свободными концами стержни соединяются один с кривошипом, а второй с ползуном. Увеличение осевой силы резания вызывает дополнительное сжатие пружины и перемещение стержня с буртиком, перемещение упора — замыкание контактов выключателя. Замыкание контактов обеспечивает подачу тока к электромагниту. Электромагнит отключает храповой механизм, и разжим притира прекращается. Процесс включения и выключения разжима притира зависит от затяжки пружины телескопического устройства, зазора между контактами и настройки реле времени. В качестве недостатка этого станка можно отметить отсутствие ускоренного разжима притира и то, что сжатие его осуществляется вручную и длительность процесса устанавливается только настройкой реле времени.

Одной из последних отечественных конструкций станков для доводки глухих отверстий является полуавтомат, разработанный Одесским СКБ прецизионных станков. На этом станке в процессе доводки деталь совершает вращательное и возвратно-поступательное движения. Притир остается неподвижным. Разжим притира производится сначала ускоренно, а после касания притиром стенки детали осуществляется медленный рабочий разжим. Переход с ускоренного разжима на рабочий производится по изменению величины крутящего момента. На станке деталь устанавливается в специальном плавающем приспособлении. Подобно станку РЦ-81/5, кривошипно-шатунный механизм этого станка имеет телескопическое устройство.

Параллельно с СКБПС (г. Одесса) полуавтомат мод. Д8170 для доводки отверстий разработан в ЦНИТА. Цикл доводки на этом станке состоит из следующих этапов: 1) зажима детали (с помощью пневмопривода); 2) включения вращения и возвратно-поступательного движения изделия; 3) разжима притира до начала контактирования с обрабатываемой поверхностью; 4) доводки с рабочей подачей (3,6 мм/мин); 5) выхаживания; 6) возвращения головки в исходное положение (верхнее); 7) отжима детали (с помощью пневмопривода); 8) реверса двигателя подачи (сжатие притира).

Отличие этого станка от разработанного СКБПС заключается в том, что высокая точность доводки на нем достигается за счет подбора оптимального закона возвратно-поступательного перемещения детали. Закон движения задается профилем кулачка. Все рассмотренные станки имеют вертикальное расположение притира. При нанесении пасты и в процессе доводки не обеспечивается ее равномерное распределение в верхней и

нижней частях. Паста сползает по притиру книзу, особенно если она жидкой консистенции, что влечет за собой разницу в съеме металла и снижение точности доводимого отверстия. Лучшие условия обеспечивает горизонтальное расположение притира.

Нами была спроектирована и изготовлена специальная установка для доводки отверстий (рис. 43—45) с горизонтальным расположением притира, которая обеспечивает автоматическое поддержание заданных режимов доводки [99]. Кроме расположения притира, она отличается от описанных выше станков тем, что ускоренный разжим притира на ней осуществляется не до начала контакта притира с деталью, а до момента достижения в процессе доводки установленной величины крутящего момента. Установка, регулирование и автоматическое поддержание крутящего момента производится при помощи специального механизма, являющегося частью установки. Деталь на установке имеет вращательное движение, а притир — возвратно-поступательное.

В рассмотренных станках отечественного производства разжим притира осуществляется стержневой оправкой, у которой в качестве рабочей части использован прямой конус. Разжим производится либо перемещением притира по конусу (натягиванием или подбивом), либо перемещением самого конуса относительно притира. В обоих случаях стержень работает на сжатие. Возникающие при этом изгибные моменты, во-первых, снижают точность доводки и, во-вторых, требуют увеличения диаметра оправки. Для устранения этих недостатков наиболее целесообразно применять разжимные оправки с обратным рабочим конусом, стержень которых работал бы на растяжение. Это позволяет избежать изгибных моментов, повысить точность доводки, особенно отверстий малых диаметров. Такой принцип особенно эффективен при доводке глухих отверстий. Он использован и в нашей установке.

Установка (рис. 43) представляет собой металлический стол, на горизонтальной и боковых поверхностях которого размещены все узлы и система управления. На горизонтальной плите установки расположены шпиндельный узел *V*, служащий для размещения, закрепления и передачи вращения заготовке; устройство *IV*, предназначенное для автоматического разжима притира и поддержания в зоне доводки предварительно установленной величины крутящего момента; механизм *III*, обеспечивающий возвратно-поступательное перемещение притира, а также узел *I*, представляющий собой электрическую систему управления установкой. Узел *I* собран в специальном шкафу, прикрепленном к торцу стола, а гидросистема *II*, подающая масло в гидроцилиндр механизма перемещения притира, установлена на специальной подставке недалеко от установки.

Изменение скорости вращения детали производится при помощи привода бесступенчатого регулирования числа оборотов с электромагнитным усилителем. Конструктивно он выполнен в виде двигателя постоянного тока *8*, электромагнитного усилителя *9* и реостата *7* с рукояткой для переключения оборотов, которая размещена на боковой стенке стола установки. Для подвода смазочно-охлаждающей жидкости в зону доводки используется стандартная насосная установка. Установка позволяет осу-

ществить два режима доводки: предварительный и окончательный. Используемые узлы, механизмы и система управления обеспечили возможность получения при доводке следующих режимов обработки:

- 1) скорость вращения детали $n = 300—3000 \text{ об/мин}$ ($31,5—315 \text{ рад/сек}$);
- 2) число двойных ходов притира в 1 мин $m = 30—280$;
- 3) величину крутящего момента в зоне доводки $M_{кр} = 1—500 \text{ кг} \cdot \text{мм}$ ($9,81—4905 \text{ н} \cdot \text{мм}$);
- 4) расход смазочно-охлаждающей жидкости $Q = 5—10 \text{ л/мин}$.

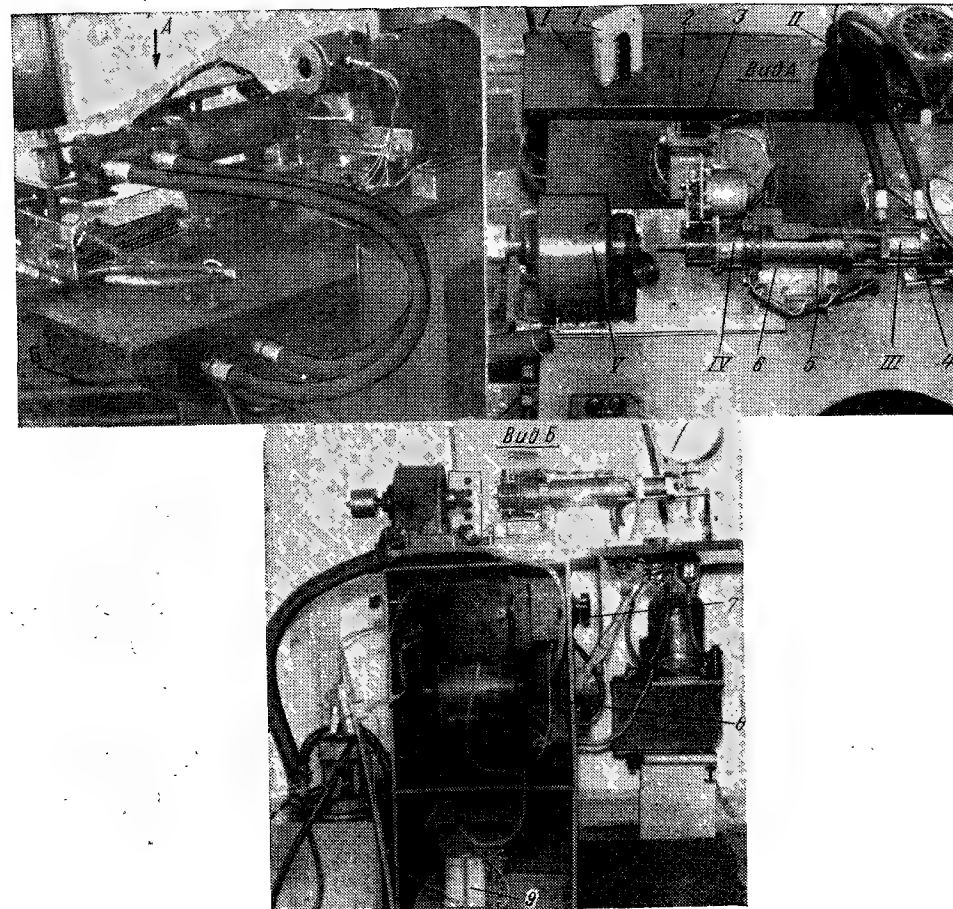


Рис. 43. Автоматизированная установка с горизонтальным расположением притира: *I* — электрическая система управления; *II* — гидросистема; *III* — механизм возвратно-поступательного перемещения притира; *IV* — устройство для автоматического разжима притира; *V* — шпиндельный узел; *1* — панель с сигнальными лампочками; *2, 3* — микропереключатели соответственно МП-3 и МП-5; *4* — микропереключатель МП-4; *5* — ручка; *6* — фиксатор; *7* — реостат; *8* — двигатель постоянного тока; *9* — электромагнитный усилитель

В установке оригинальными являются механизм автоматического разжима притира и устройство для поддержания в зоне доводки предварительно установленной величины крутящего момента [99].

Разжим притира осуществляется путем преобразования вращательного движения по цепи двигатель 1 (рис. 44) — зубчатые колеса 2 и 3 в поступательное перемещение резьбовой втулки 4. Вместе с резьбовой втулкой перемещаются валик 5 и закрепленная в нем оправка 6. При этом диаметр притира 7, который остается неподвижным относительно упора 8, увеличивается, т. е. происходит его разжим. Величина разжима пропорциональна перемещению оправки.

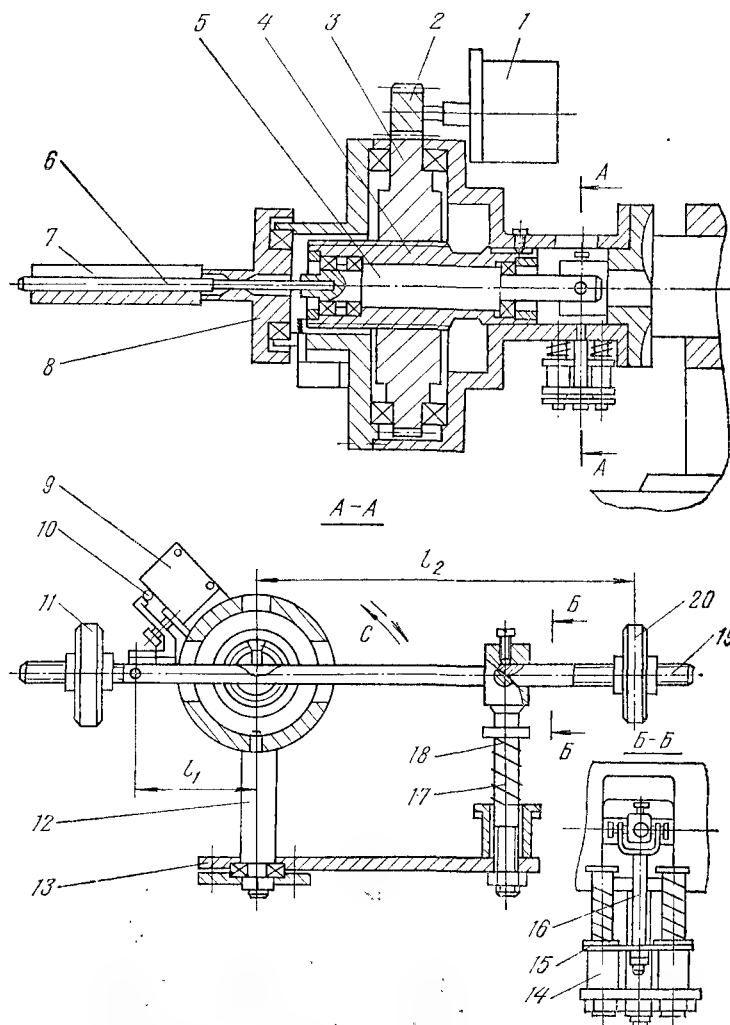


Рис. 44. Механизм разжима притира и устройство для поддержания в зоне доводки заданного крутящего момента

Устройство для поддержания в зоне доводки установленной величины $M_{кр}$ состоит из оси 19, двух противовесов 11 и 20, микропереключателя 9, управляющего работой двигателя 1, контакта 10 и демпфирующего устройства, к которому относятся валик 12, планка 13, втулка 14, пластинка 15, тяга 16 и пружины 18, расположенные на осях 17.

Принятая схема управления установкой позволила производить доводку в полуавтоматическом и наладочном режимах. При наладке установки особое внимание уделялось обеспечению одинакового выхода притира из доводимого отверстия, а также точной настройке устройства для поддержания заданного значения крутящего момента. Настройка устройства на соответствующий крутящий момент производится путем подбора и перемещения противовесов 11 и 20 по оси 19. Для этого ось 19 приводится в положение равновесия при помощи противовеса 11, затем к оси 19 на плече l_1 подвешивается настроечный груз. Момент $M_{кр}$, создаваемый этим грузом, уравнивается противовесом 20, расположенным на плече l_2 . Положение равновесия регистрировалось по тестеру Ц51-6, подключенному к микропереключателю 9. После снятия настроечного груза механизм готов к работе. Точность настройки 0,02—0,05 кг·м·и (0,1962—0,4905 н·м). Для регулирования амплитуды колебаний оси 19 использовано демпферное устройство. Регулировка осуществляется тягой 16, шарнирно соединенной с осью 19.

В процессе доводки при всех крутящих моментах, превышающих установленное при настройке значение $M_{кр}$, ось 19 поворачивается в сторону вращения детали и размыкает микропереключатель 9. При повороте оси 19 в направлении, показанном стрелкой С, движение от тяги 16 через пластинку 15 передается втулкам 14, под действием которых сжимаются пружины 18. Система находится в таком положении до тех пор, пока $M_{кр}$ в зоне доводки не сравняется с его значением, установленным при настройке. Процесс доводки в это время осуществляется без разжима притира. В процессе доводки изменение $M_{кр}$ находится в пределах 3—5%. После настройки доводку можно производить в полуавтоматическом режиме.

Общий цикл работы установки в полуавтоматическом режиме заключается в следующем:

1. Устанавливается и закрепляется оправка 6 вместе со свободно сидящим на ней притиром 7 (рис. 44).

2. Устанавливается и закрепляется обрабатываемая заготовка в шпинделе.

3. Притир намазывается абразивной пастой (с помощью волосяной кисточки) только один раз перед началом работы.

4. Нажатием кнопки «пуск» включается двигатель вращения заготовки.

5. За ручку 5 (см. рис. 43), предварительно нажав вручную на фиксатор 6, притир вводится в отверстие детали, а фиксатор отпускается. В конце ввода срабатывает микропереключатель 4, от которого включается насос гидросистемы. Насос подает масло в силовой цилиндр механизма перемещения притира. Затем притир начинает совершать возвратно-поступательные перемещения, амплитуда которых ограничивается

двумя микропереключателями МП-3. Одновременно с насосом от микропереключателя МП-4 включается двигатель 1 (рис. 44) разжима притира. Начинается ускоренный разжим притира, который будет осуществляться независимо от направления его перемещения.

6. Осуществление процесса доводки. При ускоренном разжиге притира между деталью и притиром посредством находящихся между ними абразивных зерен возникает зацепление. Когда момент сил зацепления окажется больше величины, на которую предварительно настроен механизм для поддержания в зоне доводки установленной величины $M_{кр}$, притир начнет поворачиваться в сторону вращения детали. При этом произойдет первое размыкание микропереключателя МП-1, что вызовет выключение двигателя разжима притира, включение реле времени и соответствующей сигнальной лампочки, указывающей, что процесс доводки начался.

По мере съема металла с детали момент сил сцепления уменьшается и упор механизма поддержания $M_{кр}$ под действием груза 19 (рис. 44) замкнет микропереключатель МП-1, который в свою очередь включит двигатель на разжим притира. Замыкание микропереключателя МП-1 произойдет при крутящем моменте, меньшем Pl_1 . Теперь разжим притира может происходить только тогда, когда он полностью находится в отверстии детали. Контроль положения притира обеспечивает микропереключатель МП-5. Увеличение момента сил сцепления снова приведет к размыканию микропереключателя МП-1 и отключению разжима притира. Подобное размыкание и замыкание микропереключателя МП-1 будет происходить периодически, в зоне доводки будет поддерживаться постоянный крутящий момент, величина которого заранее установлена при настройке.

По истечении времени, установленного на обработку, реле времени отключает двигатель разжима притира. Теперь притир продолжает совершать возвратно-поступательные перемещения во вращающейся детали без разжима.

7. Нажав на фиксатор 6 (см. рис. 43), ручкой 5 притир выводят из детали. При выводе притира освобождается микропереключатель МП-4, а от него выключается насос гидросистемы, подающий масло в механизм перемещения притира, и включается двигатель разжима притира на вращение в обратную сторону. При этом он вместе с оправкой отходит от упора 8 разжимного устройства. Окончание отхода фиксируется при помощи микропереключателя МП-2.

8. Снимают деталь и оправку с притиром.

Описанная установка может применяться как при доводке деталей свободным абразивом, так и при доводке инструментом с закрепленным зерном. В последнем случае необходимо применение смазочно-охлаждающей жидкости. Для подачи жидкости в зону доводки в установке применены стандартная гидроустановка и ряд защитных элементов, предохраняющих разбрызгивание жидкости в процессе доводки. Жидкость из гидросистемы 1 (рис. 45) по трубопроводу 2 поступает в приемник 3, откуда по каналу в шпинделе 4 попадает в отверстие обрабатываемой детали. Разбрызгивание жидкости в процессе доводки предохраняется

кожухом 5 и отражателем 6. Обработанная жидкость стекает в поддон 7, откуда самотеком по шлангу 8 снова поступает в бак гидросистемы.

Необходимо отметить, что приведенные выше разработки и исследования затрагивают в основном вопрос автоматизации разжима притира и компенсации его износа в процессе доводки отверстий. Такие вопросы, как подача абразивного материала в зону доводки, активный контроль размера отверстия и другие, требуют дальнейшей разработки.

В ЦНИТА создано устройство для подачи пасты в процессе доводки отверстий. Основными деталями устройства являются цилиндр, где размещается паста, и поршень, выдавливающий на притир пасту. Это устройство имеет и некоторые недостатки. Разведенная до кремообразного состояния паста имеет свойство отстаиваться. При выдавливании ее в первую очередь выдавливается жидкая составляющая, а зерна абразива при этом спрессовываются.

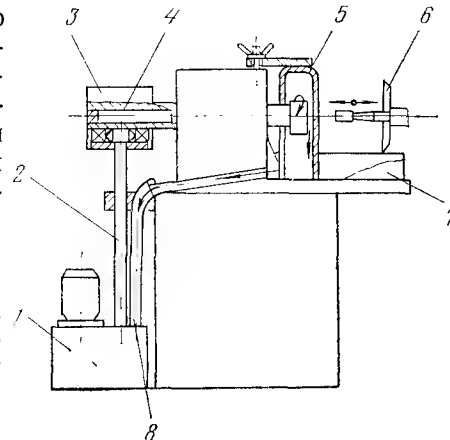


Рис. 45. Схема подвода и отвода СОЖ: 1 — насосная установка; 2 — подводящий трубопровод; 3 — приемная муфта; 4 — шпиндель; 5 — кожух; 6 — отражатель; 7 — поддон; 8 — отводящий трубопровод

Одним из направлений автоматизации подачи абразивного материала в зону доводки является применение суспензий вместо доводочных паст. Однако это направление имеет ряд серьезных недостатков: снижение производительности процесса, необходимость создания сложных устройств, предохраняющих от попадания суспензии в станок и приспособления для установки и крепления детали, и др.

Для доводки внутренних конических поверхностей, в частности уплотняющего конуса в корпусе распылителя, используется автомат 3734 конструкции ЦНИТА, полуавтомат фирмы «Хамбург» и другие станки. Принцип работы станка фирмы «Хамбург» совпадает с машинно-ручным способом доводки на доводочных бабках, широко используемым на отечественных предприятиях. Перед доводкой на этом станке паста наносится только на конусную часть. Цилиндрическая часть служит для направления и смазывается дизельным топливом. В процессе доводки притир устанавливается в нижнем шпинделе доводочной бабки и получает вращение. Возвратно-поступательное перемещение детали обеспечивается вручную. Для качественной доводки, а также для обеспечения исправления несоосности цилиндрической и конической поверхностей зазор между притиром и цилиндрической поверхностью детали должен быть в пределах 1—2 мкм. Такая точность обработки цилиндрической поверхности притиров достигается при доводке на плоскодоводочном

станке и их сортировкой на различные размерные группы. Недостатком этого способа является невысокая стойкость притиров.

Станок имеет конструкцию роторного типа с вертикально расположенными доводочными шпинделями (12 шт.). На станке используются притиры, состоящие из стального стержня и чугунной вставки. Перед доводкой притиры и детали сортируют на группы с интервалом 1 мкм. Биение конической части притира относительно его цилиндрической поверхности не должно превышать 3 мкм.

Известен и другой способ доводки высокоточных конических поверхностей. Оси детали и инструмента смещены на некоторую величину (см. рис. 6). При этом способе детали и инструмент вращаются в одну и ту же или в разные стороны. Кроме того, притир, а вместе с ним и инструментальный шпиндель, на котором он размещен, совершают возвратно-поступательные движения. В процессе обработки площадь контактирования притира и детали изменяется от некоторого одностороннего участка до полного совмещения конических поверхностей притира и детали. При ходе вниз линейный контакт притира и детали (за счет упругости в системе инструмент — обрабатываемая деталь) перерастает в объемный и при ходе вверх, наоборот, объемный контакт переходит в линейный. Диаметр притира в этом случае должен быть меньше диаметра отверстия. Недостатком этого метода является отсутствие возможности исправлять несоосность конуса и цилиндрической поверхности.

На основе данного метода в ЦНИТА разработан специальный полуавтомат для доводки поверхности уплотняющего конуса в корпусе распылителя [66]. Полуавтомат внедрен на Алтайском моторном и Челябинском тракторном заводах. Кинематическая схема полуавтомата позволяет обеспечить в процессе доводки некоторое боковое перемещение детали вместе с приспособлением, где она закреплена. При доводке должны быть регламентированы следующие величины: окружные скорости вращения притира и детали, зернистость и состав пасты, время работы с объемным контактом притира и детали, величина осевого и бокового усилий.

Полуавтомат при использовании пасты ЭБМ5 позволяет обеспечить съем металла в пределах 0,017 мм, некруглость поверхности конуса не более 0,0007 мм, непрямолинейность образующей не более 0,003 мм, шероховатость обработанной поверхности 10в—11а класса.

4. Оборудование для доводки шариков

В настоящее время на подшипниковых заводах нашей страны для доводки шариков применяются различные модели станков отечественного и зарубежного производства: ВШ-Д3, ВШ-Д14, ВШ-Д35, МШ-33, ДПШ-8, ВШ-22, ВШ-52М, ШД-100, ШД-20, ВШ-145, ВШ-314, ВШ-318, SLM-10, SLM-72, МА-10А и др. Существующие модели имеют две конструктивные формы исполнения: с вертикальной осью вращения шпинделя (ВШ-Д3, ВШ-Д14, ВШ-Д35, ДПШ-8, ВШ-52М, ШД-100, ВШ-145, ВШ-314, SLM-10, SLM-72, МА-10А и др.) и с горизонтальной (МШ-33 и др.). Опыт эксплуатации [52] на операции доводки шариков станков

различных моделей показывает, что горизонтальное или вертикальное расположение элеватора при обработке не играет принципиальной роли, но имеет некоторые существенные отличия. Так, при вертикальном расположении элеватора загрузка шариков происходит несколько легче, чем при горизонтальном. Однако станки с горизонтальными дисками имеют преимущество — получающийся шламм выпадает в нижний желобок канавки, что содействует улучшению качества поверхности и значительно ускоряет процесс доводки. Кроме того, на этих станках подвод и отвод шариков происходит таким образом, что осуществляется их хорошее перемешивание. Горизонтальный элеватор обеспечивает охлаждение шариков во время их транспортировки. Следовательно, не происходит расширения, которое обычно вызывается теплом и влияет на точность размера. Положительной особенностью горизонтального элеватора является и то, что доведенные шарики повторно подводятся к доводочным дискам только после того, когда вся обрабатываемая партия пройдет через станок. Такие условия необходимы для изготовления одинаковых по размерам шариков.

У станков с вертикальным элеватором доведенные шарики после каждого прохода смешиваются с недоеденными, что отрицательно сказывается на точности окончательно доведенных шариков и на производительности станка. Это происходит в результате того, что в дорожки диска такого станка ввиду застоев в вертикальном элеваторе постоянно попадают большие и малые шарики, которые в разной степени подвергались обработке. Вполне понятно, что общее усилие доводки действует только на большие шарики, в то время как меньшие вращаются вхолостую. Поэтому, как показывает опыт, производительность станка с горизонтальным элеватором на 20—30% выше, чем с вертикальным при одинаковых режимах работы.

Из отечественных моделей станков наибольший интерес представляют ВШ-Д3, ВШ-Д35, ВШ-318 (для безэлеваторной доводки), МШ-33 (с вертикальным элеватором), ВШ-314 (с горизонтальным элеватором).

Станок ВШ-Д3, изготовленный Витебским станкостроительным заводом, предназначен для окончательной доводки шариков диаметром от 0,8 до 2,5 мм и 0; 01; 02 степеней точности. По принципу работы он подобен упорному шарикоподшипнику, где роль колец выполняют чугунные диски. Кинематическая схема станка приведена на рис. 46, а его общий вид — на рис. 47.

Кинематическая схема станка включает четыре цепи приводов:

цепь привода стола нижнего рабочего диска осуществляется от привода I мощностью $N=3$ кВт и скоростью вращения $n=150—3000$ об/мин (15,75—315 рад/сек) на вал I, затем через клиноременную передачу со шкивами на вал II и далее при помощи червячной передачи 2 вращение получает стол;

цепь привода перемещения и прижима верхнего рабочего диска осуществляется от маховика 12 и далее при помощи конической пары и цилиндрических шестерен редуктора вращение передается гайке 6; при вращении гайки в прямом или в обратном направлении через винт 5 происходит подъем или опускание верхнего рабочего диска;

цепь привода емкостей дозаторов осуществляется от электродвигателя СД-54 на вал III, который поворачивается до момента срабатывания одного из выключателей БВК-24М;

цепь привода динамометра осуществляется от перемещения нижней колодки механизма прижима, которая воздействует на систему рычагов 7, и далее через них, рейку и сцепленную с ней шестерню 8 вращение получает стрелка.

Станина станка представляет собой жесткую и прочную конструкцию коробчатой формы, отлитую заодно с колонной. На ней и внутри нее монтируются составные части станка: стол, приводы, подвеска верхнего прижимного диска, дозаторы, коммуникации рабочих жидкостей и т. д.

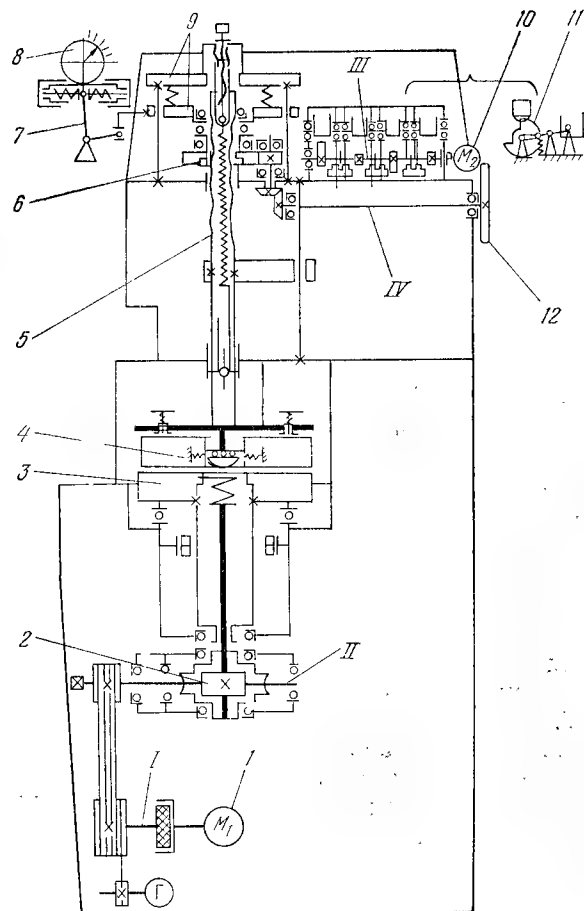


Рис. 46. Кинематическая схема станка ВШ-ДЗ: 1 — привод ПМСМ-18; 2 — червячный редуктор; 3 — стол; 4 — подвеска; 5 — винт перемещения верхнего доводочного диска; 6 — гайка; 7 — система рычагов динамометра; 8 — шестерня; 9 — колодки механизма прижима; 10 — электродвигатель СД-54; 11 — механизм опрокидывания емкости дозаторов; 12 — маховик

Планшайба, смонтированная на упорном подшипнике, и скрепленный с ней полый шпindel образуют в совокупности стол. Вращение стола осуществляется от поводкового вала через упругие элементы специальной муфты. Привод вращения стола состоит из электродвигателя и муфты скольжения, которые вместе образуют ПМСМ-18. Привод монтируется

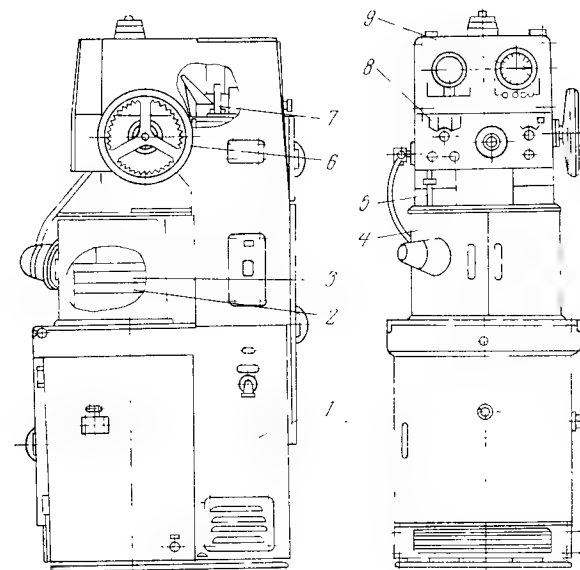


Рис. 47. Станок для доводки шариков ВШ-ДЗ: 1 — станина; 2 — нижний ведущий диск; 3 — верхний прижимный диск; 4 — ограждение; 5 — подвод рабочей жидкости; 6 — привод механизма прижима; 7 — дозаторы; 8 — электрооборудование; 9 — динамометр

на плите, имеющей направляющие типа ласточкина хвоста. С целью самоустановки верхнего прижимного диска относительно нижнего ведущего конструкция подвески выполнена плавающей. Смещение обеспечивается при помощи упругих элементов и шариков в горизонтальной плоскости, а при помощи сферического подпятника — покачивание вокруг центра, который всегда «выставляется» своей периферией в плоскость торца верхнего прижимного диска.

Вторая планшайба подвешена к поводковому диску, жестко закрепленному с пинолью штифтами, фиксация пиноли от поворота осуществляется хомутом и цилиндрической направляющей, закрепленной в станине. Для обеспечения плавности перемещения пиноли конструкция опор выполнена таким образом, что характер сопряжения их с пинолью обеспечивается за счет подтяжки бронзовых разрезных втулок гайки. Верхний конец пиноли снабжен приводной резьбовой нарезкой.

Механизм прижима состоит из опорной неподвижной колодки и нажимной подвижной, в гнездах которых размещены цилиндрические пружины сжатия. Эти детали образуют прижимный блок, смонтированный на двух тягах, которые жестко крепятся к станине. Рабочая жидкость

Основные технические данные доводочных станков

Параметры	Модели		
	ЛШ-20	ЛП-8861	ВШ-Д3
Диаметр обрабатываемых шариков, мм	0,2—1,5	0,68—5	0,8—2,5
Диаметр чугунных дисков, мм	150	300	400
Усилие прижима, кг(н)	0—75 (0—735,75)	0—300 (0—2943)	0—500 (0—4905)
Скорость вращения шпинделя, об/мин (рад/сек)	30—210 (3,15—22,05)	60(6,3) 90(9,45) 120(12,6)	60(6,3) 75(7,875) 90(9,45) 105(11,025)
Способ изменения числа оборотов шпинделя	Бесступенчато	Клиновым ремнем	Регулятором скорости
Радиальное биение дисков, мм	0,005	0,05	0,005
Торцовое биение дисков, мм	0,005	0,02	0,005
Точность обработки шариков по форме, мм	0,0001	0,0001	0,0001
Класс шероховатости поверхности	13-й	13-й	13-й
Габариты станка, мм:			
длина	945	345	940
ширина	615	500	725
высота	1780	1370	2035

в междисковое пространство попадает из отверстия общего лотка дозаторов, которые состоят из четырех емкостей и механизма опрокидывания. В каждую емкость заливается разная рабочая жидкость в соответствии с номером перехода. Распределительный вал механизма опрокидывания приводится в движение от электродвигателя СД-54, работа которого осуществляется по заданной программе. При срабатывании БВК-24М происходит поочередное в соответствии с номером перехода опрокидывание емкостей с жидкостью. При опрокидывании емкости жидкость попадает в общий лоток. Отработанная жидкость сливается в корыто станины, а затем по трубопроводу отводится в специальный сборник. Техническая характеристика рассмотренного и других доводочных станков для безэлеваторной доводки шариков приведена в табл. 36.

Опыт работы шарикоподшипниковых заводов СССР и ряда иностранных фирм показывает, что в перспективе усовершенствование доводочных операций должно развиваться по следующим направлениям [52]:

- 1) создание унифицированных станков для элеваторной и безэлеваторной доводки;
- 2) повышение точности изготовления и сборки шарикодоводочных станков;
- 3) установление норм виброустойчивости и создание станков, соответствующих этим нормам;
- 4) изыскание для элеватора и переходной системы (лотков) материалов, не наносящих (в отличие от стали и чугуна) поверхностных дефектов;

для безэлеваторной доводки шариков

станков				
ВШ-Д14	ВШ-318	ВШ-35Д	ДПШ-8	ШД-100
3—14 600 6000 (58860) 20(2,1) 28(2,94) 56(5,88) 80(8,4) Сменными шкивами 0,03 0,03 0,00015	1,5—51 800 8000 (78480) 31,5(3,3075) 45(4,725) 63(6,615) 90(9,45) Сменными шкивами 0,008 0,01 0,00025— 0,0008 13-й	6,35 800 8000 (78480) 20(2,1) 28(2,94) 56(5,88) 80(8,4) Сменными шкивами 0,008 0,01 0,00025— 0,0008 13-й	1,5—51 750 8000 (78480) 22(2,31) 29(3,045) 44(4,62) 80(8,4) Сменными шестернями 0,05 0,03 0,0002 12-й	4—100 1000 4000 (39240) 32(3,36) 48(5,04) Сменными шкивами 0,1 0,5 0,00025— 0,0008 12-й
2000 1040 2220	2100 1050 2640	2225 1150 2230	1120 1250 2100	1570 1327 2290

5) создание бесшумных станков;

6) разработка оптимальных рецептур доводочных паст и изыскание химического состава чугунных доводочных дисков, обеспечивающих максимальное повышение производительности труда и улучшение качества доведенных шариков;

7) механизация зарубки (заправки) заходов чугунных дисков;

8) оснащение шарикоподшипниковых станков приборами автоматического контроля, а также пультом регистрации давления между дисками, температуры в рабочей зоне, засорения пасты отходами обработки загрузки шариков под диски и глубины приработки дорожек.

5. Полировальные станки

Полировальные станки предназначены для отделки деталей, когда необходимо получить зеркальную поверхность. На них можно обрабатывать наружные и внутренние цилиндрические, конические и сферические поверхности и плоскости. Полировальные станки используются во всех отраслях промышленности, однако наибольшее распространение они получили в подшипниковой, оптико-механической и автотракторной промышленности. Главным движением у всех полировальных станков является вращение полировального круга или скорость движения ленты, значения которых могут достигать 45 м/сек.

Отечественная станкостроительная промышленность по номенклатуре выпускает ограниченное количество полировальных станков. Они изго-

авливаются одно- и двусторонние. Гамма двусторонних полировальных станков состоит из следующих моделей: 3А852, 3853, 3854, 3855. Односторонний станок 3854А является модификацией мод. 3854. Перечисленные станки относятся к группе универсальных. Их универсальность достигается за счет дополнительных приспособлений. К этой же группе можно отнести и бесцентровые полировальные станки 3864 и 3865. Названные станки выпускаются Дербентским заводом шлифовальных станков. Техническая характеристика этих станков приведена в табл. 37.

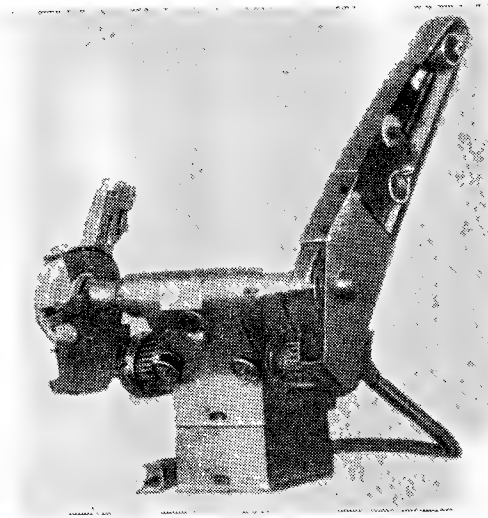


Рис. 48. Универсальный полировальный станок мод. 3853

стали, пластмасс и дерева. Станки 3А852, 3853, 3854, 3854А и 3855 могут устанавливаться непосредственно на верстаке или на подставке.

Станок мод. 3А852 выполнен по типу двусторонних доводочных бабок. Шпиндельная головка станка представляет собой встроенный двухскоростной электродвигатель. Его ротор смонтирован на шпинделе головки. Станок предназначен для полирования и слесарной отделки внутренних и наружных поверхностей деталей различных форм.

По конструкции станки мод. 3853 (рис. 48), 3854 и 3855 имеют одинаковую компоновку. В отличие от станка 3А852 в этих моделях каждый из двух шпинделей оборудован отдельным электродвигателем. Кроме того, в них применены вариаторы с широким клиновым ремнем, что позволяет осуществлять бесступенчатое регулирование скорости вращения шпинделя. Вариаторы сообщают каждому шпинделю различное число оборотов в зависимости от диаметра круга и контактного ролика. В станках мод. 3853, 3854 и 3854А электродвигатели двухскоростные.

Станки 3864 (рис. 49) и 3865 предназначены для обработки наружных поверхностей труб и круглого проката соответственно диаметром от 2 до 25 и от 5 до 100 мм и наибольшей длиной до 2000 мм. Продольная подача на станках осуществляется ведущим кругом или лентой в зависимости от угла поворота ведущего круга или ленты относительно оси шлифовального круга.

Таблица 37
Основные технические данные универсальных полировальных станков для обработки цилиндрических деталей

Параметры	Модели станков						
	для круглого и внутреннего полирования						
	3А852	3853	3854	3854А	3855	бесцентровые	
Наибольший диаметр полировального круга, мм	200	315	400	400	500	250	400
Длина ленты, мм	2000	2500	3150	3150	4000	2500	100
Ширина ленты, мм	50	70	100	100	140	60	100
Скорость вращения шпинделя, об/мин	1420; 2850	1000—3800	1000—3800	1000—3800	1000—1800	1220—2240	5,5
Наибольшая мощность электродвигателя привода шпинделя, кВт	1	2,2	5	5	7	2,2	5,5
Расстояние от оси шпинделя до пола, мм:							
без подставки	250	610	610	610	610	—	—
с подставкой	1000	1000	1000	1000	1000	—	—
Габаритные размеры, мм:							
длина	680	1560	1800	1200	2050	1200	1790
ширина	660	1000	1150	1150	1300	740	940
высота	1050	1980	2400	2400	1300	1840	2450
Вес станка, кг	240	850	1040	910	950	600	900

Еще меньше, чем для полирования круглых поверхностей, выпускается универсальных станков для полирования плоских поверхностей. К этой группе относятся станки 3890, 3892, С-15. Станок мод. 3890 предназначен для обработки плоскостей деталей весом до 10 кг. Он ручной, прост по конструкции, представляет собой жесткую раму, несущую стол, по которому движется абразивная бесконечная лента. Лента приводится

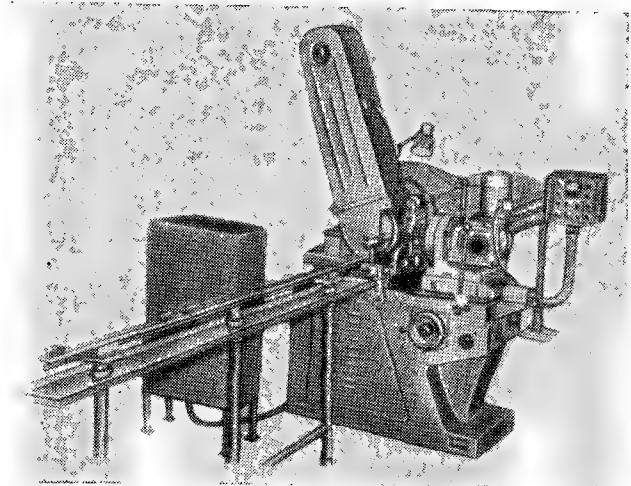


Рис. 49. Бесцентрово-полировальный станок для круглых поверхностей мод. 3864

в движение от электродвигателя через трехступенчатые шкивы и ведущий ролик. Рама вместе с лентой могут занимать горизонтальное или вертикальное положение. Более совершенна конструкция станка 3892.

Ленточно-полировальный станок мод. 3892 (рис. 50) используется для шлифования и полирования абразивными лентами плоских поверхностей деталей из стали, чугуна, цветных сплавов и неметаллических материалов. Станок имеет гидрофицированную продольную подачу, изменяющуюся в пределах 1—6 м/мин. На нем можно вести обработку деталей как всухую, так и с применением смазочно-охлаждающих жидкостей. Скорость перемещения абразивной ленты 15—25 м/сек. Ее длина 2500 мм, ширина 60 мм. Рабочая площадь стола позволяет устанавливать детали размером до 300×300×200 мм.

Плоскополировальный станок С-15 предназначен для полирования плоскостей мелких деталей размером до 50 мм. Принципиальная схема работы этого станка приведена на рис. 51. Он имеет два рабочих шпинделя 3 и четыре поводковых штифта 4 для блоков 5. Расстояние между осями шпинделей 150 мм. Они расположены на поворотном хоботе, что дает возможность устанавливать их с некоторым эксцентриситетом e . Шпиндели имеют постоянное число оборотов $n_1=192$ об/мин (20,16 рад/сек).

На станке устанавливается полировальный круг 1 диаметром до 320 мм. Круг вращается со скоростью $n_2=60$ или 120 об/мин (6,3 или 12,6 рад/сек). Если вместо мягкого полировального круга установить жесткий притир, то на станке можно производить размерную обработку, т. е. выполнять некоторые доводочные работы. Однако следует иметь в виду, что основным требованием, предъявляемым к полированным деталям, является получение высокого класса шероховатости обработки. Поэтому в отличие от доводочных станков при создании полировальных специальные узлы, механизмы и подшипники, способствующие повышению точности обработки, в конструкцию практически не вводятся. В связи с этим при использовании станка С-15 на доводочных работах точность обработки ниже, чем в случае применения доводочных станков. Детали, закрепленные в блоке 5, в процессе обработки могут поджиматься к поверхности круга. Рабочее давление создается сменными грузами 2.

Выпускаемая отечественной промышленностью номенклатура полировальных станков не отвечает быстро растущим потребностям. Перспективным направлением в области создания оборудования для по-

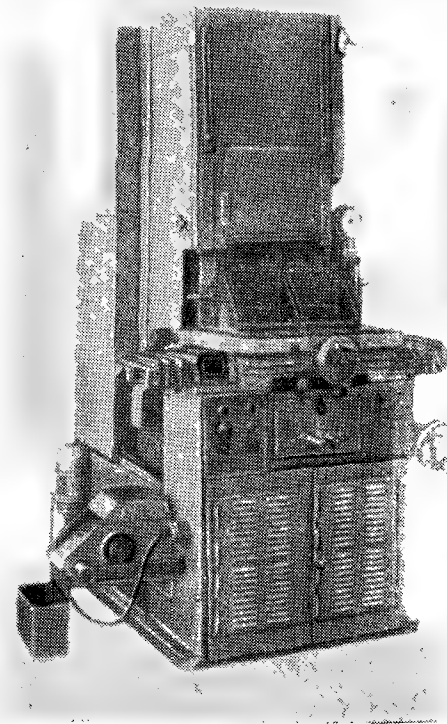
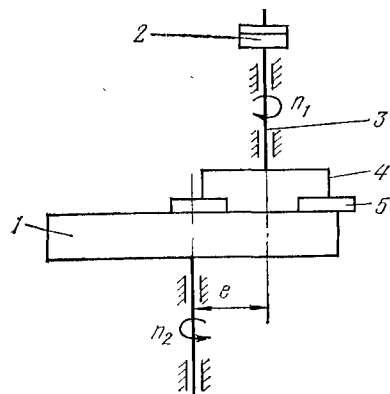


Рис. 50. Ленточно-полировальный станок для плоских поверхностей мод. 3892

лирования является разработка и производство станков из агрегатных узлов. На базе универсальных и шлифовально-полировальных станков ЭНИМС и ЦКБ оборудования гальванопокрытий (ЦКБОГ, г. Тамбов) разработали гамму агрегатных станков для обработки внутренних и наружных поверхностей и поворотных столов к ним. Гамма состоит из агрегатов двух типов: УП — для обработки наружных и УПВ — для обработки внутренних поверхностей. Монтируются агрегаты на вертикальной колонне. Перемещение шлифовальной головки по колонне производится вручную в агрегатах УП1—УП3 и УПВ1—УПВ3, а в УП4 и УП5 — от электродвигателя. Сама же колонна установлена на крестовом суппорте, что позволяет перемещать ее в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Шлифовальная головка может поворачи-

чиваться вокруг колонны и в вертикальной плоскости. Для повышения класса шероховатости полированной поверхности в агрегатах УП1—УП3 шпиндель совершает дополнительные осциллирующие колебания вдоль своей оси.

Известны также станки-автоматы и полуавтоматы. Чаще всего (в отличие от станков, применяемых для доводки) эти станки предназначены для обработки не какой-либо поверхности, а конкретной детали, например автоматы для полирования металлической ленты, деталей велосипеда (руля, втулки заднего колеса, обода колеса и т. д.), колец подшипников и др.



При полировании применяются и автоматические линии, например автоматическая линия по полированию рефлекторов автомобиля. Основные элементы, обеспечивающие высокое качество полирования

Рис. 51. Принципиальная схема станка для плоских поверхностей мод. С-15

при применении полировальных кругов, следующие: скорость вращения полировального круга; зернистость и состав применяемой пасты; давление круга на деталь; кинематика перемещения детали относительно круга; режим охлаждения.

В бесцентрово-полировальном станке для обработки желоба наружного кольца шарикоподшипника ЛЗ-194 в качестве абразивного материала используется суспензия из электрокорунда М28 и охлаждающей жидкости (подается циклически); скорость войлочного круга 22 м/сек; давление на кольцо 3—4 кГ (29,43—39,24 Н). Это обеспечивает получение 11-го класса шероховатости поверхности желоба.

К проблемам, требующим решения при создании станков для полирования эластичными кругами, следует отнести создание автоматических устройств для подачи полировальной пасты, повышение стойкости полировальных кругов, повышение работоспособности полировальных паст, создание активного контроля шероховатости обработанной поверхности.

В последние годы получили широкое распространение новые методы полирования: шлифовальной шкуркой, струей абразивной жидкости, полирование в барабанах. Эти способы весьма перспективны в направлении автоматизации процесса.

Простота полирования шлифовальной шкуркой и его большие возможности привели к созданию разнообразных по конструкции ленточно-полировальных станков. Известны станки для полирования корыта пера турбинных лопаток, лопаток крыльчатки, ленточно-полировальный полуавтомат мод. ЛЗ-36 для полирования кулачков распределительных валов автомобильных двигателей. Фирма «Нортон» изготавливает ленточно-

полировальные станки или приспособления для полирования шеек коленчатого вала.

Большое внимание также привлекает полирование в барабанах. Известно несколько способов этого полирования: 1) в барабанах консольного типа с наклонной осью вращения; 2) в герметически закрытых барабанах с горизонтальной осью вращения; 3) в перфорированных барабанах; 4) в специальных барабанах; 5) в виброконтейнерах.

Самым перспективным методом является полирование в виброконтейнерах, так как оно наиболее производительное и легко поддается автоматизации.

В качестве полирующих материалов применяются бой шлифовальных кругов, неабразивные наполнители и рабочие жидкости. Рабочие жидкости представляют собой водные растворы поверхностно-активных веществ (раствор ядрового 72%-ного мыла, едкого натра, кальцинированной соды, гашеной извести, азотно-кислого натрия и других веществ).

В качестве наполнителей используются: 1) металлические детали-шарики, цилиндрики, отходы штамповочного производства; 2) неметаллические частицы (тела) — кукурузные кочерыжки, кожа, обрезки фетра, опилки.

В настоящее время уже на многих заводах внедрены различные процессы виброполирования. Так, например, на Московском автозаводе им. И. А. Лихачева внедрена виброустановка 40П-9452 для полирования лопастей гидронасоса автомобиля ЗИЛ-130. Установка работает с 3000 кол/мин и амплитудой 2,5 мм. В течение 2,5 час обрабатываются 3 тыс. деталей, т. е. на полирование одной детали практически тратится 3 сек.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ТОНКОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

1. Физическая сущность процесса полирования и доводки

Важнейшими технологическими факторами, определяющими долговечность машин, являются геометрическая точность отдельных деталей и качество рабочих поверхностей. Высокая точность обработки достигается за счет повышения кинематической точности и жесткости оборудования, а также совершенствования методов наладки. Повышению точности способствует разделение обработки на предварительное, чистовое и в некоторых случаях окончательное шлифование. Вполне понятно, что чем больше действительные формы деталей приближаются к идеальным геометрическим, тем выше долговечность.

Интересно отметить, что анализ долговечности подшипников [90], изготовленных с одинаковыми геометрической точностью и шероховатостью рабочих поверхностей, при стендовых испытаниях в идентичных условиях показал, что фактическая долговечность отдельных подшипников партии может отличаться в 10—15 раз. Это можно объяснить различием физико-механических свойств тончайшего поверхностного слоя деталей толщиной всего лишь в несколько десятков микрон. Эти свойства характеризуются в основном микротвердостью (наклепом), внутренними напряжениями и структурой. Есть основание полагать, что из указанных факторов, определяющих физико-механические свойства, большое влияние на долговечность оказывает микротвердость поверхности. С увеличением микротвердости повышаются усталостная прочность и износостойчивость.

Результаты наших исследований [90], а также проведенных в ВНИИПП показывают, что все тонкие процессы абразивной обработки (полирование, доводка, суперфиниш, хонинг-процесс и др.) создают в поверхностном слое в большинстве случаев остаточные напряжения сжатия. Их величина и глубина «залегания» зависят от вида и режимов обработки.

Напряжения сжатия повышают усталостную прочность, что очень важно для подшипников качения. Существует мнение, что фактор напряжения должен рассматриваться не как самостоятельный, а как следствие, вытекающее из наличия наклепа обработанной поверхности, характеризующегося главным образом величиной микротвердости. Изменение

величины микротвердости поверхностного слоя в зависимости от методов и режима окончательной обработки деталей — весьма актуальный вопрос, способствующий изучению сущности процессов тонкой абразивной обработки.

Сущность процесса доводки и полирования и природа поверхностного слоя, полученного при этих методах, еще не выяснены. На процесс полирования и доводки существует несколько точек зрения, среди которых выделим основные.

Первая теория проводит аналогию между шлифованием и полированием. При шлифовании абразивные зерна более твердые, чем шлифуемый материал, поэтому последний в результате срезов, выколок поверхности, царапин, сдвигов и т. д. подвергается довольно грубому разрушению кристаллической структуры. Полирование отличается лишь тонкостью процесса, так как абразивные зерна здесь очень мелкие и производят почти невидимые срезы. Эта гипотеза несостоятельна, потому что не может объяснить случая, когда твердый материал хорошо полируется более мягким. Также трудно объяснить получение зеркально полированной поверхности при применении абразивного материала более твердого, чем полируемое изделие.

Вторая теория основное внимание при полировании уделяет пластическим деформациям полируемой поверхности. Согласно этой точке зрения, при полировании происходит лишь пластическое течение материала, при котором перераспределяется только верхний слой металла — за счет выступов заполняются впадины поверхностных шероховатостей. Эти взгляды не отражают действительности, так как при пластическом течении материала не должен изменяться вес обрабатываемой детали, однако всегда наблюдается уменьшение веса полируемых изделий. Несостоятельность этих взглядов подтверждается при полировании стекла смолы. Исходя из данной теории, следовало бы ожидать прежде всего пластического течения смолы, а не стекла.

Третью точку зрения по этому вопросу в начале XX в. высказал Бейльби. Он считал, что в процессе притирки и полирования происходит чрезвычайно сильное нагревание поверхности и металл приобретает жидкое состояние. Расплавленный металл под влиянием поверхностного натяжения образует гладкую поверхность, мгновенно застывает и не успевает приобрести кристаллическое строение. Полученному поверхностному слою приписывается аморфный характер, или «беспорядочная скученность атомов». Но, как известно, еще никем не получен металл в виде некристаллического, аморфного состояния. Кроме того, металл хорошо полируется смоляным полировальником, при этом, конечно, трудно представить, чтобы в контакте этих материалов можно было создать температуру плавления стали. Многие детали доводятся и полируются с добавлением охлаждающей жидкости. Возможность плавления в этих условиях маловероятна.

По теории акад. И. В. Гребенщикова [91], в процессе полирования основную роль играют химические процессы, происходящие на обрабатываемой поверхности. Углубления и выступы на полированной поверхности не превышают по своим размерам длину световых волн. В неко-

торых случаях они могут достигать $1/200$ части световой волны, т. е. порядка $20 \text{ \AA}$ (2 нм). Если считать, что расстояние между центрами атомов в кристаллической решетке металлов равно примерно $5 \text{ \AA}$ ($0,5 \text{ нм}$), то средняя высота неровностей на полированной поверхности не превышает четырех слоев атомов. Для стеклянных поверхностей она достигает одной-двух молекул. Это говорит о том, что при полировании рассматриваем явления, происходящие на поверхности полируемых деталей, при изучении которых не могут не учитываться отдельные свойства не только молекул, но и атомов. По мнению И. В. Гребенщикова, сущность явлений, происходящих в процессе полирования стекла, заключается в последовательном снятии с поверхности стекла тончайших пленок коллоидно-кремниевой кислоты толщиной от 14 до $70 \text{ \AA}$ (от $1,4$ до 7 нм).

Пленка образуется за счет химического воздействия воды на обработанную поверхность стекла. Полировальник при движении (через средство абразивных зерен) срывает пленку с выступов, и обнажившаяся свежая поверхность стекла, реагируя с водой, вновь покрывается пленкой кремниевой кислоты. В углублениях же пленка остается на поверхности стекла, защищая его от действия воды. Теоретически этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не исчезнут все углубления. Тогда пленка будет срываться со всей поверхности как шкурка, обнажая поверхность стекла. Предельная точность полирования стекла равна толщине пленки — около $20 \text{ \AA}$ (2 нм).

По мнению И. В. Гребенщикова, аналогичные явления происходят и при полировании металлов. Металлическая поверхность всегда бывает покрыта оксидной пленкой, которая образуется практически мгновенно. Так, например, слой окислов толщиной $14 \text{ \AA}$ ($1,4 \text{ нм}$) образуется на железе в $0,05$, на свинце — в $0,42 \text{ сек}$. Не только кислород, но и хлор, йод, сера столь же быстро реагируют с чистыми поверхностями металлов, образуя соответствующие пленки. Эти пленки легко срываются даже мягкими абразивными порошками, например окисью хрома. Особенность таких пленок — способность притягивать к себе (адсорбировать) тонко измельченные вещества и прочно их удерживать.

В состав полирующей пасты входят абразивные вещества, стеариновая (или олеиновая) кислота или жиры. Исключительное значение имеет наличие стеариновой кислоты, чрезвычайно энергично адсорбируемой поверхностью металла, побывавшей на воздухе.

Таким образом, поверхности полировальника и полируемого изделия, покрытые окислами, адсорбируют молекулы стеариновой кислоты, причем кислотные части молекул располагаются у поверхности металла, а жирные радикалы выходят наружу. Порошкообразные вещества (абразивные), применяемые при полировании, адсорбируют жирные части молекул кислот, покрывающих поверхности металлов, как бы склеивают две поверхности (обрабатываемую и полировальника). Вследствие разных скоростей движения изделия и полировальника пленка, покрывающая обрабатываемую поверхность, срывается в первую очередь во всех тех местах, где полировальник близко подходит к обрабатываемой поверхности. Обнажившаяся поверхность металла под влиянием кислорода или другого химического реагента вновь мгновенно покрывается плен-

кой, которая снова срывается полирующим порошком. Таким образом, шероховатости постепенно удаляются и получается ровная поверхность, которая не была подвергнута грубым механическим воздействиям, вызывающим разрушение кристаллической решетки. Если же представить, что при полировании пользуются зернами абразивного материала более мягкими, чем кристаллы металла, и вместе с тем более твердыми, чем пленка, то будет удаляться только слой пленки, без разрушения самого металла. Однако эта гипотеза не может объяснить полноту явлений, происходящих при полировании и доводке.

Как отмечает А. С. Ахматов [92], невозможно исходить только из представлений универсальной химической гипотезы, считая, что именно химическим процессам принадлежит ведущая роль при объяснении всех явлений полирования твердых тел.

При полировании стали роль химических процессов значительно меньше [90]. Полирование в атмосфере водорода вместо воздуха, как показывают эксперименты, течет несколько медленнее (примерно на 30%). Следовательно, при выключении реакций окисления полирование происходит медленнее, но так как процесс идет, то, очевидно, в основном он совершается за счет какого-то другого нехимического механизма. Кроме того, хорошо известны и широко применяются чисто нехимические процессы полирования, например полирование дерева спиртовыми растворами воска. В этом процессе окисление или иные химические действия, по-видимому, отсутствуют. Процесс является в значительной мере физическим, однако он обеспечивает получение поверхностей зеркального блеска.

Следует отметить также, что смазочные пленки на поверхности металлов обладают свойствами высокой упругости формы и высокой механической прочностью. Эти показатели для пленок нередко выше, чем для обрабатываемого металла. В этих условиях обработка полированием будет заключаться в том, что акты воздействия абразивных зерен и полировальника на граничный смазочный слой будут носить упругий обратимый характер. Эти слои только иногда будут подвержены пластическому течению и разрушениям. Участки же металлической поверхности, лежащие под граничным смазочным слоем, почти всегда будут испытывать пластическое течение. Абразивные зерна становятся не только режущими микрорезцами, но и микрокатками, пластически выкатывающими через граничный слой металлическую поверхность.

Понижение механической «стойкости» граничного слоя, увеличение твердости зерен абразива, рост давления и т. д. способствуют увеличению удельного разрушения резанием по сравнению с пластическим перераспределением поверхностных слоев металла. При этом фактически происходит замена одного способа обработки другим, осуществляется переход от зеркального полирования к доводке, шлифованию свободным зерном.

По нашему мнению, при полировании не происходят указанные выше процессы в чистом виде. Одновременно действуют следующие факторы:

1) химическое воздействие поверхностно-активных полирующих веществ (стеариновой кислоты, парафина и др.);

2) резание абразивными зернами или размельчение (диспергирование) тончайшего поверхностного слоя;

3) пластическое течение микрорельефа полируемой поверхности.

Качественные показатели полирования (производительность, гладкость и зеркальность поверхности, степень механического повреждения кристаллического строения, микротвердость и т. д.) зависят от того, какой из указанных факторов имеет главное значение.

При выяснении механизма образования обработанной поверхности сначала следует учитывать проявление чисто геометрических факторов (без учета пластических деформаций). Для этого проведем некоторое сравнение процесса шлифования и полирования.

При шлифовании резание происходит закрепленными в шлифовальном круге абразивными зернами. Эти зерна в его объеме расположены хаотично. Кинематика процесса шлифования такова, что за время контакта очень маленькой площадки на поверхности изделия с ней встречается большое количество абразивных зерен, расположенных на рабочей поверхности шлифовального круга, в результате чего образуется режущий контур, который копируется на указанную элементарную площадку шлифуемой поверхности.

При полировании изделие имеет большую окружную скорость (4—10 м/сек), а инструмент (полировальник) — сравнительно медленное движение. Основное рабочее движение осуществляется деталью, поэтому на ее поверхности образуются следы обработки в виде еле заметных кольцевых рисок.

При полировании беговых дорожек колец шарикоподшипников [90] применяют абразивную, т. е. обычную шлифовальную шкурку, намазанную пастой типа ГОИ. Относительно крупные зерна наклеены на полотно, а между ними размещаются зерна полирующей пасты (рис. 52). Следовательно, режущий контур получается более ровным, чем при шлифовании. Он образуется скрепленными и свободными абразивными зернами. Отличительная особенность этого режущего контура — подвижность (или податливость) его режущих элементов (зерен). Скрепленные абразивные зерна находятся на эластичной податливой основе (полотно, войлок, фетр, клей и др.). Поэтому зерна не могут наносить глубоких царапин на обрабатываемом металле и величина врезания различных зерен выравнивается. Этими свойствами не обладает шлифовальный круг, так как зерна закреплены в связке круга более жестко.

Свободные зерна хорошо удерживаются шкуркой, чему способствует обволакивание их остальными составляющими компонентами пасты. Эти зерна так же, как и скрепленные, участвуют в резании, они как бы накапывают полируемую поверхность, производя при этом сьем металла. Исходный микрорельеф обрабатываемой поверхности непрерывно изменяется в процессе полирования в направлении от шероховатого к зеркально-гладкому. Этому способствует постоянное и непрерывное изменение величины зерен в период от начала и до конца полирования. В первый момент режущий контур вступает в контакт с обрабатываемым микрорельефом только по некоторым вершинам. По мере выравнивания полируемой поверхности количество зерен, вступающих в работу, увели-

чивается, происходит процесс затупления и дробления зерен. Свободные зерна, перекапываясь в процессе резания, шарошат абразивный слой шкурки, сами дробятся и дробят закрепленные зерна. К концу полирования контактных «режущих точек» создается так много, что их активность сильно снижается и резание по существу почти прекращается.

Так как все абразивные зерна, находясь на эластичной основе, обладают большой податливостью, то при их контакте с гладкой поверхностью трудно представить, чтобы они могли наносить царапины разной

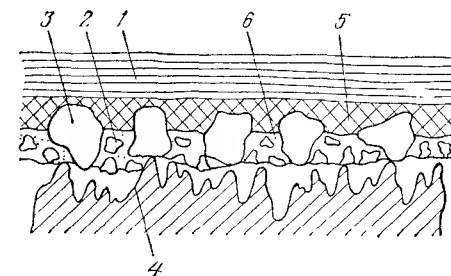


Рис. 52. Схема образования полированной поверхности: 1 — полотно; 2 — свободные абразивные зерна, находящиеся в пасте; 3 — абразивные зерна, закрепленные на полотне; 4 — исходный микрорельеф полируемой поверхности; 5 — связующий материал абразивной шкурки; 6 — полирующая паста

глубины. Отталкивающие силы, воспринимаемые эластичной массой, и глубины резов-царапин будут примерно равны. Это способствует получению зеркально-гладкой поверхности. Такова примерно картина резания с чисто геометрической точки зрения.

Процесс резания практически не может осуществляться с полным отсутствием пластических деформаций. Кроме того, тепло, развивающееся при трении, также способствует пластическим деформациям. Последние вносят существенное изменение в механизм образования полированной или доведенной поверхности. Если представить, что процесс протекает согласно гипотезе И. В. Гребенщикова, то при удалении окисной пленки произойдут локализованные пластические деформации, выходящие за границу окисной пленки, что и подтверждается некоторым повышением микротвердости тончайшего поверхностного слоя после полирования.

При полировании гребешки микронеровностей размягчаются и металл как бы размазывается по обрабатываемой поверхности. Причем в начале процесса большее значение имеют факторы резания, а в конце его — факторы пластического течения металла (размазывание и заглаживание поверхности). Но поскольку в конце процесса режущий контур становится очень ровным, то и размазывание пластического слоя осуществляется тоже очень ровно.

На микрофотографии полированной поверхности (рис. 53) состояние поверхностного слоя зафиксировано с помощью электронного микроскопа УЭМ100. Наблюдалось состояние рабочих поверхностей качения шарикоподшипника № 306. После закалки колец исследуемая поверхность подвергалась шлифованию и полированию по установленной на ГПЗ-11 технологии и соответствовала 11-му классу шероховатости [90].

На микрофотографиях видны следы ровного пластического выглаживания и имеются незначительные сгустки металла. Выхватов, надиров,

вмятин и обрывов металла здесь гораздо меньше, чем при самом тонком шлифовании абразивным кругом. Это говорит о том, что процесс выглаживания поверхности в конце цикла полирования протекает более благоприятно, чем при тонком шлифовании.

При полировании абразивной шкуркой, намазанной пастой (рис. 54, *a*), пластическое деформирование микрорельефа проявляется несколько меньше, чем при полировании фетром или войлоком с нанесением на него пасты (рис. 54, *б*). Вероятно, при работе фетром влияние теплоты трения большее и на поверхности металл выглаживается широкими полосами. Удельное значение резания здесь меньше, чем при обработке абразивной шкуркой, так как абразивное воздействие осуществляется только за счет зерен пасты.

Следует отметить, что при любом виде полирования и доводки с применением активных паст, безусловно, имеют место химические реакции,

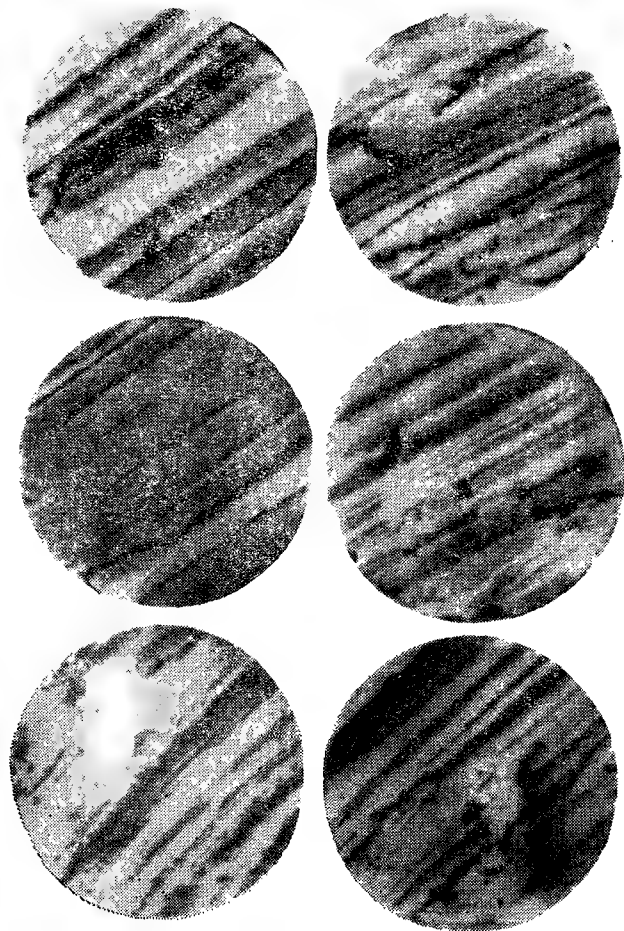


Рис. 53. Микрофотографии полированной поверхности ($\times 1320$)

ускоряющие процесс обработки. По нашему мнению, зернистость шкурки и абразивного порошка пасты должна подбираться так, чтобы образующийся режущий контур как бы вписывался в зону оксидной пленки полируемой поверхности. При этом химические процессы, резание и пластическое течение металла будут происходить в основном в объеме пленки и тем самым меньше будет подвергаться грубым механическим воздействиям и разрушениям обрабатываемая металлическая поверхность.

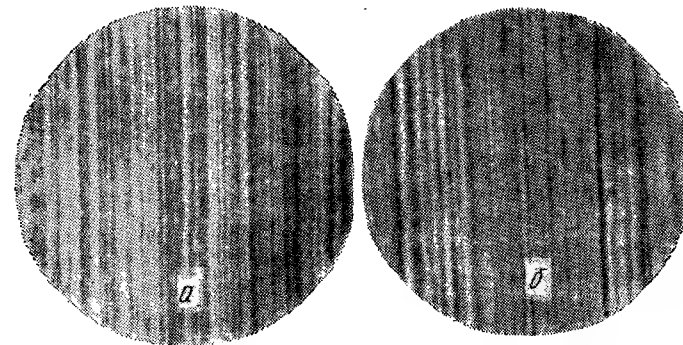


Рис. 54. Микрофотографии полированной поверхности закаленной стали ШХ15. Шероховатость поверхности 106 класса: *a* — полирование абразивной шкуркой с пастой; *б* — полирование фетром с пастой (полосы пластически сглаженного металла широкие) ($\times 600$)

Таким можно представить идеальный процесс обработки металлической поверхности. В действительности зона резания и зона пластических деформаций заходят значительно глубже окисной пленки. Тем не менее эта пленка облегчает процесс удаления металла. Химически активные вещества создают на металлической поверхности многослойные окисные пленки. Разница состоит только в том, что окисление при полировании протекает более активно по сравнению с окислением в случае применения охлаждающей жидкости.

Скольжение двух поверхностей возможно при наличии на них окисных пленок. Толщина их редко превышает 100 Å (10 нм). Удаление поверхностных пленок приводит к повышению коэффициента трения до 100 раз, прочность сцепления на поверхности контакта не отличается при этом от прочности глубинного материала. Образование пленки окислов сопровождается резким уменьшением коэффициента трения, а также вероятности налипания металла к зернам абразивной шкурки.

Ф. П. Боуден и Д. Тейбор отмечают [93], например, что низкий коэффициент трения алмаза обуславливается наличием на его поверхности адсорбированных пленок. После очистки алмаза в вакууме коэффициент трения металла по алмазу увеличивается в 15 раз, трение при этом сопровождается вырыванием частиц и переносом их на алмаз.

Применение химически активной смазки сопровождается резким уменьшением износа и коэффициента трения. Опытами установлено, что присутствие такой смазки снизило коэффициент трения в 20 раз, а количество перенесенных частиц с одной поверхности на другую уменьшилось

в 20 000 раз. Уменьшение коэффициента трения при полировании приводит к уменьшению контактной температуры и улучшению качества поверхности.

Принципиальную зависимость величины температуры в зоне контакта от основных параметров при работе абразивного инструмента выражает формула Иегера

$$\theta = \frac{kfp(V)^{0,5}}{(\lambda\gamma c)^{0,5}}, \quad (53)$$

где θ — мгновенная температура в зоне контакта; k — постоянный коэффициент; f — коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому металлу; p — удельное давление в точке контакта, кг/см^2 (н/м^2); V — длина контакта, см (м); V — скорость резания, м/сек (при полировании скорость вращения детали); λ — коэффициент теплопроводности металла, $\text{кг/см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}$ ($\text{вт/(м} \cdot \text{град)}$); γ — удельный вес обрабатываемого металла; c — теплоемкость обрабатываемого металла, $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ ($\text{дж/(кг} \cdot \text{град)}$).

Уменьшение величины l имеет пределы и не всегда желательно, уменьшение p и V приводит к снижению производительности. Следовательно, наиболее эффективным средством снижения температуры в зоне резания является уменьшение коэффициента трения f . Снижение контактной температуры в свою очередь уменьшает вероятность молекулярного схватывания и налипания.

Исследования И. М. Брозголь [94] показали, что при полировании желобов колец шарикоподшипников на обработанной поверхности возникают напряжения растяжения, которые на глубине 1 $\mu\text{м}$ от поверхности переходят в напряжения сжатия. Напряжения растяжения создаются главным образом от действия тепла.

На наш взгляд, растягивающиеся напряжения, оставшиеся в очень тонком слое полированной поверхности, появились на предшествующих операциях, т. е. при шлифовании, так как оно сопровождается большим выделением тепла. При полировании же всегда создаются сжимающие напряжения. Во втором периоде рабочего цикла полирования, т. е. во время выглаживания, имеет место трение абразивной шкурки о металлическую поверхность и почти отсутствует резание. Для исследования этого периода можно применять законы трения.

В. А. Кудинов установил [95], что вопреки существующему и общепризнанному в настоящее время мнению о том, что максимальная температура возникает на поверхности при наличии пластически деформируемого слоя, в действительности этот максимум имеется на некоторой глубине под поверхностью трения.

Если ось Z направить перпендикулярно полируемой поверхности, уравнение теплопередачи будет иметь следующий вид:

$$\frac{d^2\theta_v}{dz^2} = -\frac{1}{\lambda} q_v. \quad (54)$$

Условие на поверхности

$$-\lambda \left(\frac{d\theta_v}{dz} \right)_{z=\delta} = \alpha (\theta_s - \theta_c). \quad (55)$$

Условие симметрии закона распределения температуры

$$\left(\frac{d\theta_v}{dz} \right)_{z=0} = 0.$$

Решая уравнение

$$\theta_v = \theta_c + q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} \left[1 + \frac{2\lambda}{\alpha\delta} - \left(\frac{z}{\delta} \right)^2 \right],$$

при $z = 0$ получаем

$$\theta_{v_{\max}} = \theta_c + q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} \left(1 + \frac{2\lambda}{\alpha\delta} \right), \quad (56)$$

при $z = \delta$

$$\theta_s = \theta_c + q_v \frac{\delta}{\alpha} = \theta_c + \frac{q}{\alpha}, \quad (57)$$

где q — тепловой поток через единицу поверхности слоя в единицу времени; q_v — тепло, выделяемое в единицу объема, $\text{ккал/м}^3 \cdot \text{час}$; θ_c — температура среды; θ_s — температура на поверхности; α — коэффициент теплоотдачи; δ — толщина деформированного поверхностного слоя.

Перепад температуры в поверхностном слое

$$\Delta\theta = \theta_{v_{\max}} - \theta_s = q_v \frac{\delta^2}{2\lambda} - q \frac{\delta}{2\lambda}. \quad (58)$$

Исследования показывают, что под поверхностью трения возникает температура, на сотни градусов превышающая температуру самой поверхности. Это способствует улучшению качества полированной поверхности, так как при пониженной температуре образуются напряжения сжатия. Кроме того, в данных условиях снижается степень пластичности граничного слоя металла, в результате чего шероховатость поверхности улучшается (установлено, что при очень пластичном верхнем слое происходит наволакивание металла, образуются сгустки и надиры, ухудшающие поверхность).

Наличие напряжений растяжения только на глубине до 1 $\mu\text{м}$ свидетельствует о незначительной глубине распространения контактной температуры. Прижоги поверхности в таких условиях практически исключены.

Процесс резания можно представить следующим образом. Вследствие адсорбции поверхность твердого тела всегда покрыта тончайшей пленкой другого вещества, содержащегося в окружающей среде. В условиях адсорбции подвижность адсорбированных молекул значительна. Образующиеся в процессе деформации микротрещинки под влиянием ад-

сорбции расширяются. В результате адсорбирования в этих микротрещинах, или, как еще их называют, микрощелях, молекул окружающей среды (при полировании, например, молекул олеиновой кислоты) возникает значительное давление на стенки микрощелей, способствующее их дальнейшему развитию в глубь металла. Адсорбированные молекулы играют роль своеобразных «клиньев», загоняемых в микротрещинки.

Образующиеся в процессе пластической деформации трещинки распространяются с чрезвычайно высокой скоростью. Известно [96], что эти трещинки в стали распространяются со скоростью 1000 м/сек.

Ультрамикроскопические трещинки в зоне резания превращаются в микроскопические. При этом возникают вновь образованные ювенильные поверхности, которые имеют предельно искаженную кристаллическую решетку и с высокой скоростью покрываются молекулами сольватного слоя.

Если скорость диффузии в результате деформирования поверхностного слоя увеличивается до 1 тыс. раз, то скорость диффузии в разрушаемый металл возрастает до 1 млн. раз, причем скорость самодиффузии для металлов по границам зерен протекает в 10^4 — 10^6 раз быстрее, чем в зерне [97]. Следовательно, химический процесс ускоряет процесс резания.

Роль олеиновой кислоты, активно создающей окисные пленки, особенно велика в момент окончательного формирования поверхности, т. е. в период выглаживания ее (в конце процесса полирования). Здесь явление налипания должно быть устранено или ослаблено, в противном случае образуются надиры и накаты обработанной поверхности. Олеиновая кислота особенно эффективна при полировании в диапазоне повышенных давлений на полировальник. Это объясняется тем, что с возрастанием давления тенденция к молекулярному схватыванию контактируемых поверхностей возрастает, поэтому необходима изолирующая окисная пленка.

В настоящее время существуют две точки зрения по вопросу выбора финишных абразивных операций. Одни исследователи предпочитают отделку брусками, другие — абразивной шкуркой. Шлифовальный круг или абразивный брусок принципиально отличаются от абразивной шкурки, хотя на первый взгляд как инструменты они имеют одну и ту же природу. Следовало бы ожидать, что доводка брусками как самый тонкий процесс шлифования будет аналогична процессу полирования. В действительности это не так.

Для финишных операций абразивная шкурка является более совершенным инструментом. Она обладает свойством автоматического регулирования процесса в течение одного рабочего цикла, обеспечивая тем самым постепенный переход от резания к процессу выглаживания. Абразивные бруски работают только по принципу резания. Здесь нет перехода от крупнозернистого к мелкозернистому процессу. В любой момент рабочего цикла в работе участвуют зерна примерно одинаковой величины, что имеет существенное значение.

Известно, что даже при одной и той же маркировке фактические характеристики брусков могут значительно отличаться друг от друга. По-

этому при одинаковых условиях, но при смене бруска может получаться различная шероховатость обработки поверхности. Если брусок более твердый, он будет работать с затуплением и с засаливанием, при этом исходные шлифовочные риски не выведутся, если же брусок более мягкий, он будет непрерывно резать, т. е. работать на режиме шлифования. В данном случае всегда будут оставаться риски как следы собственного резания. Условия образования поверхности получаются нестабильными.

Абразивная шкурка сама в процессе работы создает стабильные условия образования полированной поверхности. Процесс дробления зерен к концу цикла приводит рабочую поверхность шкурки в одинаковое состояние, а поэтому и выглаживающий эффект всегда одинаков.

В каждом цикле характер перехода от процесса резания к процессу заглаживания совершенно одинаковый и в зависимости от режима работы автоматически поддерживается. Следовательно, можно сказать, что при работе шкуркой сохраняется строгая внутренняя закономерность протекания рабочего цикла, а при работе брусками такой закономерности не существует. Разброс исходной фактической характеристики брусков создает разброс результатов, характеризующих шероховатость поверхности. В последнем случае постоянство режимов обработки не гарантирует постоянства качества поверхности. Нельзя отождествлять шлифование с полированием. Полирование отличается не только тонкостью процесса, но и его природой.

На наш взгляд, и в процессе доводки, подобно полированию, имеют место как механические, так и химические явления, а также пластическое деформирование.

Следует отметить, что некоторые исследователи, признавая наличие всех перечисленных элементов механизма процесса доводки, пытаются определить степень значимости каждого из них. Так, П. П. Панасов [98], исследуя доводочную стружку, произвел качественную оценку влияния каждого из элементов. Полученная при плоской доводке стружка состояла из 97% неокисленного металла, а содержание окислов в ней не превышало 3%. Это позволило автору сделать вывод о том, что основное значение при доводке имеют резание металла и пластические деформации, а роль химических процессов при этом невелика. Нам представляется, что эти данные требуют некоторого уточнения. Определение степени значимости химических процессов, возникающих при доводке только по стружке, на наш взгляд, дает несколько заниженные результаты.

Доводочным процессам, которые по своей физической сущности довольно близки к полированию, свойственны и существенные отличия. Известно, что обработка поверхностей многих деталей машин и приборов машиностроительной, приборостроительной, оптико-механической и других отраслей промышленности может осуществляться приемами хрупкого и пластического разрушения. К приемам хрупкого разрушения следует отнести удар, выкалывание и выдирание частиц, а к приемам пластического разрушения — нажим инструмента на поверхность, выдавливание металла, срезание частиц и т. д. Полирование является типичным случаем обработки, вызывающей пластическую деформацию, при этом в процессе полирования происходит и пластическое разрушение. Прове-

денные нами электронографические исследования стекла, ферритов и других неметаллических материалов показали, что поверхностный слой полированных деталей не имеет правильной кристаллической структуры, а представляет собой слой с сильно деформированной решеткой.

Опыты А. В. Шубникова, изучавшего полирование поверхностей стекла и кварца, недостаточно подготовленных под полирование, позволили установить, что и при обработке данных материалов происходят пластические деформации. Подтверждением этому служит то, что при такой обработке возможно сначала некоторое улучшение поверхности, т. е. уменьшение шероховатости, которое затем сопровождается резким ухудшением ее с отрывом частиц. Это объясняется тем, что при полировании образуется упрочненный хрупкий слой толщиной около 2 мкм, который при дальнейшей обработке может только хрупко разрушаться, отслаиваясь, «лупиться».

Доводка представляет собой процесс, для которого в общем балансе разрушающих факторов доля хрупкого разрушения возрастает. В этом смысле доводка больше приближается к процессам шлифования. Хрупкое разрушение при доводке во многом зависит от характера движения зерна, который определяется нормальной нагрузкой, скоростью относительного перемещения, твердостью и шероховатостью контактирующих поверхностей и смазкой. В процессе доводки зерна могут скользить, перекатываться или проскальзывать с перекатыванием. Существенное влияние на характер движения зерна оказывают однородность зернового состава и форма зерна.

2. Основные технологические факторы, влияющие на эффективность абразивной доводки и полирования

В качестве параметров сравнительной оценки эффективности отделочной обработки приняты съем металла с детали W , износ притира q , шероховатость доведенной поверхности и другие показатели. Эффективность абразивной доводки и полирования определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, материала притира (или полировальника), абразива, смазочно-охлаждающей жидкостью, подаваемой в зону обработки, а также факторами, характеризующими режим обработки. Рассмотрим некоторые из них.

Свойства материала обрабатываемой детали и инструмента. В процессе доводки съем металла осуществляется одновременно с детали и с притира. Соотношение объемов, снимаемых с детали и с притира, зависит во многом от соотношения их поверхностей, которое может колебаться от 1 : 2 до 1 : 0,3.

На результаты процесса доводки большое влияние оказывает твердость материала детали. С увеличением твердости уменьшаются съем металла с детали и шероховатость обработанной поверхности. Чаще всего для абразивной доводки используют притиры, твердость которых ниже твердости обрабатываемой детали. Это объясняется тем, что в процессе доводки абразивные зерна должны внедряться в материал прити-

ра и удерживаться в нем в процессе воздействия на обрабатываемую поверхность.

Имеются и другие мнения. В работе [59] для плоской доводки сплава Н41ХТ рекомендуется в качестве притира закаленная быстрорежущая сталь Р18, твердость которой почти в 2 раза выше твердости материала детали.

Выше отмечалось, что наиболее широкое распространение в промышленности в качестве материала для притиров получил серый чугун с ферритной, перлитной и перлитно-ферритной структурой.

Б. К. Драгунас и Л. П. Кумпикас [100], исследуя процесс плоской доводки, установили, что серый перлитный чугун обеспечивает наибольший съем металла с детали, но по сравнению со стальными и стеклянными притирами дает более высокую шероховатость поверхности.

На износ притира при доводке отверстий оказывает влияние ряд факторов: продолжительность процесса t , скорость вращения детали n , скорость возвратно-поступательных перемещений притира m в отверстии и концентрация K абразива в пасте. Рост величины названных параметров вызывает увеличение износа притира.

Использование метода математического планирования эксперимента позволило нам установить зависимость износа притира от перечисленных факторов и представить ее в виде адекватных математических уравнений. При этом выявлена степень влияния каждого фактора. Более подробно этот вопрос рассмотрен в гл. VI. Установлено также, что крутящий момент в зоне доводки в интервале 8—22 кг·мм (78,48—215,82 н·мм) не оказывает существенного влияния на износ чугунного притира.

Для улучшения технологических свойств чугунных шарикодоводочных дисков проведено [101] легирование их различными добавками. Вводились фосфор, сера, олово, титан, сурьма и никель. Установлено, что изменение олова и сурьмы от 0,1 до 1% практически не изменяет твердости притиров. Структура таких чугунов состоит на 99% из перлита. Сера оказывает сложное влияние на структуру чугуна. При введении до 0,3% образуется большое количество сульфидных включений. С повышением содержания серы до 1% были получены диски с отбеленной структурой за счет появления в ней свободных цементных включений.

Результаты испытаний показали, что по сравнению с другими материалами сернистые чугунные диски с содержанием серы 0,16—0,2% имеют наименьший износ и обеспечивают меньшую шероховатость поверхности.

Влияние параметров абразива и характера взаимодействия зерна с обрабатываемой поверхностью. Геометрию абразивного зерна можно оценивать по количеству режущих углов и выступов (макроеметрия), степени гладкости поверхностей, образующих эти углы и выступы (микроеметрия зерна), и по радиусу закругления углов и выступов. По ранее разработанной методике [2] нами проведено измерение линейно-геометрических параметров микропорошка. Результаты этих исследований приведены в табл. 38.

Проведенное нами изучение под микроскопом большого количества абразивных электрокорундовых зерен показало, что многие из них име-

Линейно-геометрические параметры микропорошков

Микропорошок		Длина l , мкм	Ширина b , мкм	Средние значения		
материал	зернистость			ρ , мкм	ε , град (рад)	l/b
Л	M40	21,3—59,8	14,8—40,2	3,10	78(1,365)	1,23
	M20	10,8—29,5	7,7—20,3	1,90	77,4(1,3545)	1,24
	M10	5,3—14,6	3,8—10,2	0,68	77,2(1,351)	1,29
14A	M40	22,9—93,4	10,9—43	3,90	93(1,6275)	1,59
	M20	5,6—40,1	3,9—24,1	2,04	91,5(1,60125)	1,72
	M10	4,7—22,8	3,2—10,6	0,82	89(1,5575)	1,83
24A	M40	23,3—87,9	11,6—44,2	3,70	91(1,5925)	1,67
	M20	5,8—39,8	4,1—25,2	1,76	89,5(1,56625)	1,65
	M10	4,8—23,2	3,3—10,3	0,74	89(1,5575)	1,81
63C	M40	20,1—97,5	6,8—49,5	3,40	88,6(1,5505)	1,63
	M20	5,3—41,8	2,95—22,7	1,63	86,8(1,519)	1,75
	M10	4,1—26,7	2,7—12,8	0,70	85,5(1,49625)	1,85
АСО	60/40	32,5—88,4	22,1—58,2	2,30	71(1,2425)	1,41
	40/28	20,6—58,9	15,4—41,2	2,00	69,5(1,21625)	1,25
	28/20	15,1—41,3	11,0—29,3	1,32	69(1,2075)	1,26
	20/14	10,2—29,9	7,4—20,8	0,85	68,7(1,20225)	1,34
	10/7	5,1—14,7	3,7—10,5	0,41	69,6(1,218)	1,39
АСР	50/40	25,8—70,2	17,1—57,5	2,90	79,5(1,39125)	1,28
АСВ	50/40	21,8—71,9	18,3—53,9	3,30	82,5(1,44375)	1,30
АСК	50/40	21,6—75,4	16,6—56,3	3,20	83(1,4525)	1,33

ют днпирамидальную ориентировку. Встречаются зерна, напоминающие тетраэдр и трехгранную призму и другие геометрические и негеометрические формы.

Н. И. Богомолов, изучая процесс абразивной обработки с использованием единичного зерна, установил возможность саморегулирования процесса, которая заключается в том, что при определенном давлении абразивное зерно разрушается и тем самым автоматически регулирует максимальную глубину своего проникновения в металл.

Исходя из возможности разрушения алмазного зерна, можно считать, что механическая прочность существенно влияет на технологические показатели процесса доводки. Неправильный выбор алмазных зерен по механической прочности может увеличить расход алмазов более чем в 8—10 раз и до 2 раз снизить производительность.

Режущая способность абразивных зерен определяется не только их твердостью, но и строением, прочностью и другими свойствами абразивных и обрабатываемых материалов.

В большинстве случаев при определении абразивной способности такие факторы, как величина давления, скорость доводки, размер абразивных зерен, не учитываются. В последнее время осуществлена попытка

[104] приблизить условия экспериментального определения абразивной способности и износостойкости зерен к реальным условиям обработки. Разработана методика и сконструирована специальная установка, позволяющая осуществить процесс микрорезания заготовок, имеющих окружную скорость от 1 до 36 м/сек, непосредственно абразивными зернами.

В литературе имеются данные о влиянии величины абразивного зерна на его режущую способность. Так, при исследовании процесса плоской доводки С. М. Кедров установил, что наибольшее влияние на производительность доводки оказывает увеличение размеров зерна от M1 до M28. Дальнейшее увеличение размеров зерна не приводит к росту производительности и стойкости притиров, но ухудшает шероховатость обработки.

В основу изучения механизма отделочных процессов З. И. Кремень предлагает положить два основных признака: 1) число степеней свободы абразивного зерна; 2) вид взаимодействия зерна с обрабатываемой металлической поверхностью. Число степеней свободы абразивного зерна может изменяться от 1 до 6 в зависимости от способа закрепления его в поверхности притира (полировальника). Степень шаржирования абразивных зерен в поверхность притира и детали определяется удельным давлением, твердостью притира и детали, кинематикой их относительного перемещения, зернистостью абразивных зерен.

В некоторых случаях [105] эффективность процесса (производительность и качество обработанной поверхности) связывают с величиной вероятности шаржирования абразива в рабочую поверхность притира. Более предпочтительны условия, при которых вероятность шаржирования зерен в притир выше, чем в деталь. Для оценки вероятности B шаржирования зерна в поверхность притира А. А. Ковалевым [106] предложена формула

$$B = \frac{T_{\text{пр}} S_{\text{пр}}}{T_{\text{дет}} S_{\text{дет}}} k_{\text{см}} k_{\text{шпр}}, \quad (59)$$

где $T_{\text{пр}}$ и $T_{\text{дет}}$ — твердость притира и детали; $S_{\text{пр}}$ и $S_{\text{дет}}$ — площадь контакта зерна с притиром и деталью; $k_{\text{см}}$ — коэффициент относительной смазываемости притира и детали; $k_{\text{шпр}}$ — коэффициент относительной шероховатости поверхности притира и детали. При $B < 1$ вероятно шаржирование зерна в притир, при $B > 1$ — зерна в деталь.

Для оценки взаимодействия зерна с поверхностью детали можно использовать соотношение h/ρ , где h — глубина внедрения зерна; ρ — радиус округления вершины зерна. Известно [107, 108], что отношение глубины h внедрения индектора, царапающего металл, к радиусу округления вершины его ρ может служить параметром, определяющим характер деформирования поверхностного слоя. При $h/\rho < 0,02$ происходит упругое деформирование, при $0,02 \leq h/\rho < 0,5$ — пластическое деформирование, при $h/\rho \geq 0,5$ — резание металла.

Для определения вероятностей упругого и пластического деформирования микрообъемов металла абразивными зернами, а также вероятности микрорезания найдено [109] распределение P_v случайной величины $v = h/\rho$:

Изменение характера и величины расчетной деформации от продолжительности доводки и абразивного микропорошка

Величина вероятности деформирования	ЭБМ7				Характеристика микропорошка (время доводки 3 мин)		
	продолжительность доводки, мин				ММ7	ЭБМ7	ЭТЗМ7
	0,5	1	2	3			
$P_{упр}$	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,05
$P_{пл}$	0,34	0,46	0,49	0,66	0,55	0,66	0,86
$P_{рез}$	0,65	0,52	0,49	0,31	0,43	0,31	0,09

характерна наибольшая вероятность срезания стружки ($P_{рез} = 0,43$), тогда как зерна электрокорунда титанового ЭТЗМ7 осуществляют в основном пластическое деформирование металла ($P_{пл} = 0,86$, $P_{рез} = 0,09$).

Получено неплохое согласование эффективности применения исследованных материалов с установленными особенностями механизма действия зерен в зоне доводки. Пасты из монокорунда и электрокорунда обеспечили наибольший съем металла, пасты из электрокорунда титанового — наименьшую шероховатость обработанной поверхности. Это объясняется тем, что в первом случае преобладает срезание стружки, а во втором — трение с пластическим деформированием и своеобразным выглаживанием поверхности.

Очевидно, что для правильного использования того или иного абразивного материала необходимо иметь аналогичные данные о механизме действия зерен. Эти данные могут быть получены на основе глубокого изучения механизма образования обработанной поверхности. При этом, кроме рассмотренных факторов, должно быть учтено влияние удельного давления, скорости резания, твердости материалов детали и притира, состава доводочной пасты.

Исследование размеров микростружки показало, что увеличение размеров абразивных зерен ведет к росту толщины и ширины микростружек.

Известно, что переход от упругих деформаций к пластическим начинается всегда, когда выполняется следующее условие:

$$\frac{h}{\rho} \approx 200 \frac{\sigma_s}{E^2}, \quad (62)$$

где σ_s — предел текучести; E — модуль упругости.

Для оценки глубины вдавливания абразивного зерна в упругую пластину можно воспользоваться известной из теории упругости зависимостью

$$h = 0,76 \sqrt{\frac{2P^2}{d} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2}, \quad (63)$$

$$P_v(X) = \frac{e^{-\alpha_3}}{4\pi\sigma_h\sigma_\rho} \left\{ \frac{4}{\alpha_1} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_1}} e^{\frac{\alpha_2^2}{4\alpha_1}} \times \right. \\ \times \left[2\Phi\left(\frac{\alpha_2}{\sqrt{2\alpha_1}}\right) - 1 \right] + \frac{\alpha_4}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_1}} e^{\frac{\alpha_4^2}{4\alpha_1}} \times \\ \times \left[2\Phi\left(\frac{\alpha_4}{\sqrt{2\alpha_1}}\right) - 1 \right] \right\}, \quad (60)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{X^2}{2\sigma_h^2} + \frac{1}{2\sigma_\rho^2}; \quad \alpha_2 = \frac{A_h X}{\sigma_h^2} + \frac{A_\rho}{\sigma_\rho^2}; \\ \alpha_3 = \frac{A_h^2}{2\sigma_h^2} + \frac{A_\rho^2}{2\sigma_\rho^2}; \quad \alpha_4 = \frac{A_h X}{\sigma_h^2} - \frac{A_\rho}{\sigma_\rho^2};$$

A_h , A_ρ — среднеарифметическое значение h и ρ ; σ_h , σ_ρ — среднеквадратичное отклонение h и ρ ; $\Phi(y)$ — функция Лапласа.

Вероятность упругого $P_{упр}$ и пластического деформирования $P_{пл}$, а также резания $P_{рез}$ рассчитывалась по формуле

$$P_v(X_1 < v < X_2) = \int_{X_1}^{X_2} P_v(X) dX. \quad (61)$$

Расчеты производились для случая плоской доводки стальных деталей (HRC 62—65) с помощью чугунных притиров (HB 180) и абразивных паст (электрокорунд М7 — 30%, вазелиновое масло — 20, керосин — 30, стеарин — 15, олеиновая кислота — 5%) при давлении 0,6 кГ/см² (58,86 кН/м²) и скорости 10 м/мин. Доводочная паста подавалась в зону доводки через каждые 30 сек.

Входящие в формулу (60) параметры A_h и σ_h были рассчитаны по профилограммам обработанных поверхностей, а параметры A_ρ и σ_ρ получены в результате измерений большого числа зерен микропорошков. Расчеты показали, что относительная глубина внедрения зерен в металл h/ρ находится в интервале 0,1—2, что соответствует 1/30—1/10 размера зерна.

Значения вероятностей упругого $P_{упр}$ и пластического $P_{пл}$ деформирования, а также резания $P_{рез}$ для условий плоской доводки приведены в табл. 39 [109].

Из таблицы следует, что при доводке пастой ЭБМ7 независимо от продолжительности процесса вероятность упругой деформации очень мала. В начальный период преобладает резание металла ($P_{рез} = 0,65$), затем постепенно резание заменяется пластическим деформированием микрообъемов ($P_{пл} = 0,66$). Характер соотношения между $P_{упр}$, $P_{пл}$ и $P_{рез}$, установленный для продолжительности процесса 3 мин, практически не изменяется при изменении материала абразивного порошка. Однако для монокорунда

где d — средний диаметр абразивного зерна (шара); E_1 — модуль упругости материала зерна; E_2 — модуль упругости материала детали; P — нормальная сила.

В. Л. Горбенко отмечает, что расчет глубины внедрения зерна в деталь необходимо связывать со свойствами детали и размером зерен. При защемлении абразивного зерна между двумя пластинами, одна из которых является упругой, а другая пластичной, для определения глубины внедрения зерен в пластичную пластину им предложена следующая формула:

$$h = 1,13 \sqrt{\frac{P_N f}{\sigma_{см}}}, \quad (64)$$

где P_N — нормальная сила, способная разрушить зерно; f — коэффициент трения; $\sigma_{см}$ — напряжение смятия.

Изменение материала зерна и характера его закрепления в инструменте отражается и на параметрах эффективности.

И. М. Брозголь [110] провел сравнение обрабатываемости сталей ЭИ347Ш, 9Х18 и ШХ15 различными абразивными инструментами. Использование шлифовальной шкурки из электрокорунда дало хорошие результаты при доводке стали ШХ15 и удовлетворительные для 9Х18. Для доводки стали ЭИ347Ш эти шкурки непригодны. Это объясняется тем, что твердости карбидов и инструмента не имеют необходимого соотношения в 2,5—3 раза. Микротвердость карбидов сталей ЭИ347Ш, 9Х18 и ШХ15 ориентировочно равна соответственно 1700—2000, 1400—1600 и 1000—1100 кг/мм² (16,677—19,62; 13,734—15,696 и 9,81—10,79 Гн/м²).

Применение шкурки из карбида кремния также не дало положительных результатов. В процессе доводки происходит интенсивное дробление зерен карбида кремния. Использована и шкурка из хромистого электрокорунда, отличающегося повышенной износостойкостью. Обработка этими шкурками характеризуется повышением съема металла и шероховатости обработанной поверхности для стали ШХ15. При обработке таких сталей, как 9Х18, шкурка дает хорошие результаты по съему и по шероховатости поверхности, для ЭИ347Ш она непригодна.

Исследована работоспособность алмазной шкурки, которая по микротвердости превышает твердость карбидов стали ЭИ347Ш в 5 раз и более. Алмазная шкурка сохраняет свою работоспособность в течение длительного времени. Съем металла с кольца из стали ШХ15 при длительности цикла 60 сек в 2 раза больше, чем из сталей 9Х18 и ЭИ347Ш. По величине съема металла между сталями 9Х18 и ЭИ347Ш нет разницы.

Исследована эффективность алмазной и абразивной паст при доводке колец из стали ЭИ347Ш [110]. Испытания проводились на станке для доводки шкурками, причем вместо шкурки под брусок, выполняющий роль доводника, подкладывалась лента из шифона, на которую наносился слой пасты. Режим доводки: скорость изделия — 6 м/сек; удельное давление — 12 кг/см² (1177,2 кн/м²); число двойных качений — 600 в 1 мин; угол качения — 25° (0,4375 рад). Установлено, что при доводке пастами влияние факторов режима на величину съема такое же, как и при доводке шкуркой.

Изменение зернистости с М5 до М40 незначительно увеличило съем металла колец из стали ЭИ347Ш. Алмазная паста М5 позволяет достигнуть 12-го класса, а М3—М1 — 13-го класса шероховатости. В процессе доводки абразивные зерна вступают в работу постепенно. В начальный период количество активных зерен невелико. В основном это зерна крупной фракции. Они первыми воспринимают нагрузки, больше разрушаются. С течением времени количество активных зерен все больше возрастает. Такой рост происходит до определенного предела. В этот период съем металла идет наиболее интенсивно, в дальнейшем интенсивность снижается. Это положение нами было проверено экспериментально.

Опыты показывают, что зависимость съема металла, снятого в течение 1 мин, от продолжительности доводки имеет горбообразный характер. Это связано с постепенным вхождением в работу сначала зерен крупной, затем других фракций. При доводке отверстий в стальных закаленных образцах стойкость электрокорундовых зерен была в 2—3 раза ниже, чем эльборовых, и в 5—6 раз и более ниже, чем алмазных. Подобное наблюдается и при других видах доводки.

При плоской доводке [111] электрокорундом белым пик наблюдался при продолжительности 10 мин. Кубический нитрид бора дал наибольшую скорость при продолжительности 30 мин, а зерна синтетического алмаза — 60 мин.

Чем выше твердость абразивного материала, тем выше производительность доводки и ниже класс обработанной поверхности. Исследования плоской доводки деталей из стали Х12Ф1, твердого сплава ВК6М и других материалов [112] позволило выявить зависимости минутной производительности процесса от вида абразивного материала. Результаты этих исследований представлены на рис. 55 и 56. Опыты проводились на чугуном притире при давлении $P = 0,88$ кг/см² (86,528 кн/м²) с переменной скоростью $V_d = 80—175$ м/мин.

В качестве абразивного материала были использованы алмаз синтетический, алмаз натуральный и эльбор. Концентрация этих материалов в пасте составляла 5%.

Из рис. 55 следует, что наибольшая скорость съема металла при продолжительности процесса больше 3 мин наблюдается у эльбора при обработке стали Х12Ф1 (кривая 3) и самая малая у эльбора при обработке ВК6М. В первые минуты работы зерна эльбора происходит повышенное дробление. Поэтому в это время минутный съем с использованием эльборовых паст меньше, чем алмазных. После шаржирования зерна эльбора в притир стабильно обеспечивается повышенный съем металла. Зерна эльбора при доводке твердого сплава обеспечивают меньший минутный съем, чем зерна алмаза.

Твердостью материала детали, характером разрушения ее поверхности могут быть объяснены данные по съему металла с детали (рис. 56). Так, например, при доводке керамики ЦМ-332 (как самого твердого из исследованных материалов) наблюдался и самый малый съем материала с детали.

Существенное влияние на съем металла оказывает плотность «насыщения» обрабатываемой поверхности абразивными зернами. Установле-

но, что зависимость съема металла от плотности абразивных зерен имеет пик при $0,1\text{--}0,3 \text{ Г/см}^3$. Дальнейшее увеличение плотности ведет к снижению съема металла и повышению шероховатости обработанной поверхности.

В УкрНИИСМИ исследовано влияние количества алмазной пасты на съем кремния. Пластины полировались на шлифовально-полировальных станках мод. В1МЗ на полировальнике диаметром 380 мм, обтянутом

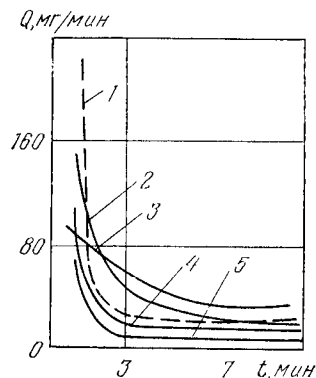


Рис. 55. Зависимость минутной производительности образцов из различных материалов от продолжительности доводки (по П. Н. Орлову): 1 — АМ 5/3, ВК6М; 2 — АСМ 5/3, Х12Ф1; 3 — ЛМ5, Х12Ф1; 4 — АСМ 5/3, ВК6М; 5 — ЛМ5, ВК6М

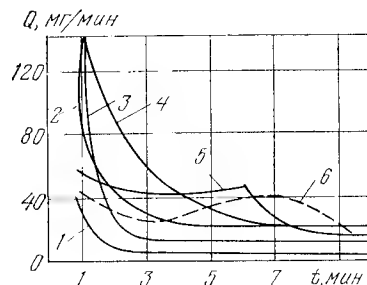


Рис. 56. Зависимость минутной производительности образцов из различных материалов от продолжительности доводки с использованием пасты АСМ 5/3 (по П. Н. Орлову): 1 — керамика ЦМ-332; 2 — феррит 1000НН; 3 — твердый сплав ВК6М; 4 — сталь Х12Ф1; 5 — ститалл 224-18; 6 — ститалл ТС-81

электростатической замшей. Использовались алмазные пасты зернистостью 3/2, 2/1 и 1/0 2%-ной концентрации (состав пасты принят по рецепту УкрНИИСМИ [46]).

Установлено, что оптимальный удельный расход пасты (на единицу площади полировальника), обеспечивающий максимальную производительность полирования, составляет 0,17; 0,27; 0,35 мг/см² соответственно для паст зернистостью 1/0; 2/1; 3/2.

Соотношение между количеством жидкости и абразива в суспензии. Использование оптимального количественного соотношения абразивных зерен и рабочей жидкости в суспензии позволяет сократить расход абразива на 50—90%. Объем подаваемой суспензии в единицу времени имеет оптимум, величина которого зависит от оптимального количества абразива. Количество подаваемой в зону доводки жидкости в единицу времени оказывает такое же влияние, как и скорость доводки, и давление [113]. Зависимость производительности доводки от количества подаваемого абразивного порошка из карбида кремния размером 18 мкм при однократном его нанесении (через каждые 300 оборотов притира) показывает, что оптимальное содержание абразивного порошка составляет 0,5 г на

3 г жидкости. При этом плотность абразивного слоя равна 10^5 зерен/см^2 , а среднее давление на одно зерно составляет 3 мн ($29,43 \cdot 10^{-6} \text{ н}$).

Стойкость однократного нанесения абразивного слоя (до полной потери абразивной способности) устанавливалась в зависимости от отношения общей площади поверхности всех обрабатываемых деталей к площади притира. При отношении, равном 0,05, стойкость T_a составляет около 4,5 мин, при 0,25 — около 1 мин. Удельная производительность доводки практически не зависит от соотношения площадей деталей и притира как при доводке чугуна, так и при доводке стали. При установлении количества абразивной суспензии и соотношения жидкости (Ж) и зерен (Т) применялось капельное нанесение абразивной суспензии. Суспензия подавалась каплями с интервалом, составляющим 1/4 периода стойкости T_a . Наибольшая производительность получена при расходе жидкости, равном объему жидкости, подававшейся при однократном нанесении ее на притир.

При обработке стекла рекомендуется соотношение жидкой и твердой фаз Ж:Т=2(3):1 для абразивных порошков любой зернистости и Ж:Т=1:1 для микропорошков [114].

Соотношению количества жидкости и абразива уделено большое внимание в работе [115]. Оптимальным считается количество абразива, которое естественным образом укладывается в одном слое зерен на поверхности полировальника. При недостатке жидкости усиливаются контактирование зерен с деталью и полировальником и закрепление зерен в полировальнике, в результате чего на обработанной поверхности появляются характерные глубокие царапины. При избытке жидкости практически все зерна могут свободно перемещаться и вращаться. Поэтому обработанная поверхность в этом случае матового цвета с наличием крупных выбоин, образовавшихся вращающимися крупными зернами. Сделана попытка установить оптимальное количество абразива и жидкости и при инерционной круговой притирке [116]. В качестве модели зерна принят октаэдр. Для расчета количества абразива и жидкости предложены следующие зависимости:

$$Q_a \approx 0,2 k_1 v q_a, \quad (65)$$

$$Q_{ж} \approx 0,8 k_2 v q_{ж}, \quad (66)$$

где Q_a и $Q_{ж}$ — количество абразива и жидкости; q_a и $q_{ж}$ — удельные веса абразива и жидкости; k_1 и k_2 — коэффициенты, учитывающие величину зазоров между абразивными зернами; v — объем слоя рабочей смеси: $v = Fh$ (F — площадь рабочей поверхности притирочной плиты; h — толщина слоя рабочей смеси).

Расчеты показали, что максимальное количество абразива на поверхности доводочного диска составляет 5,6 г на 1 м².

Экспериментальная проверка расчетных данных осуществлялась при доводке закаленных деталей из стали 45 (HRC 34—37). Лучшие результаты по производительности получены при использовании абразива от 0,4 до 2,1 г на 1 м² и 2,1 г жидкости на 1 м². Оптимальное соотношение абразива и жидкости 1:3.

Влияние состава неабразивной части доводочных паст и суспензий. Процесс доводки и его эффективность определяются не только родом абразивного материала и размерами зерен, но и составом доводочных паст. В состав паст и суспензий вводят смазывающие, охлаждающие, диспергирующие и омыляющие вещества. Неабразивная часть или жидкотекучие составляющие паст и суспензий должны выполнять следующие основные функции: 1) обеспечивать равномерное распределение жидкости и абразивных зерен по поверхности притира и детали;

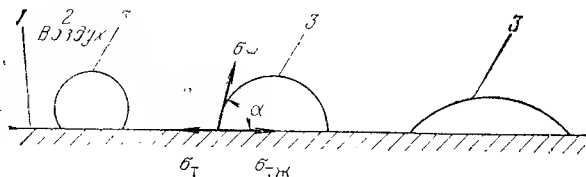


Рис. 57. Схема растекания капли по поверхности твердого тела: 1 — твердое тело; 2 — воздух; 3 — капля

2) устранять слипание частиц стружки, отработанных измельченных зерен и зерен мелкой фракции; 3) улучшать условия диспергирования и формообразования обрабатываемой поверхности детали; 4) охлаждать обрабатываемые поверхности. Выполнение первых двух функций неразрывно связано с такими свойствами жидкостей, как смачивающая способность и вязкость.

На рис. 57 представлена схема растекания смазочной жидкости по поверхности металла. Необходимая для преодоления сил сцепления между твердым телом и жидкостью работа сил адгезии при растекании жидкости определяется величиной краевого угла смачивания α твердого тела жидкостью и поверхностными натяжениями на границах раздела твердое тело — жидкость $\sigma_{тж}$, твердое тело — воздух $\sigma_{тв}$ и жидкость — воздух $\sigma_{жв}$. Между собой эти величины связаны уравнением Юнга $\sigma_{тв} - \sigma_{тж} = \sigma_{жв} \cos \alpha$. Чем меньше поверхностное натяжение жидкости на границе с воздухом и с твердым телом, тем лучше жидкость растекается по поверхности твердого тела. Хорошо растекаются по поверхности металлов органические жидкости: глицерин, масло касторовое, стеариновая кислота, бензол, олеиновая кислота, гексадекан, бутиловый спирт, тексан, которые имеют поверхностное натяжение соответственно 62,5; 36,4; 28,9; 28,9; 28,6; 27,64; 24,6 и 18,4 эрг/см² (0,0625; 0,0364; 0,0289; 0,0289; 0,0286; 0,02764; 0,0246 и 0,0184 н/м).

Большое влияние на растекаемость оказывает вязкость жидкостей. Скорость растекания жидкостей по стеклу возрастает приблизительно в обратном пропорциональной зависимости к логарифму их вязкости [117]. Смазывающая способность масел близкой вязкости с увеличением поверхностного натяжения и уменьшением растекаемости улучшается в следующем порядке: силиконы < минеральные масла < дизели.

Растекаемость, поверхностное натяжение и вязкость жидкости оказывают существенное влияние на параметры процесса обработки. Во

ВНИИ Алмаз исследовано растекание жидкостей по поверхности осколков монокристалла алмаза [47].

Смачивание изучали на ограниченной плоскости алмаза (111). Кристаллы алмаза перед опытом обезжиривали бензолом. Исследуемую жидкость наносили каплями. Смачивание оценивалось по величине краевого угла, образуемого каплей исследуемой жидкости на алмазе, а также по удельной растекаемости F/m (F — площадь растекания капли; m — масса капли). Краевой угол и площадь растекания определялись по проекции образца с каплей, для чего были использованы микроскоп МБС-1 и микропроекторная установка МПР-1. Взвешиванием алмаза с каплей и без нее определяли массу капли. Исследовалось растекание следующих жидкостей: этиленгликоля, диэтиленгликоля, глицерина, касторового масла, дипроксанола 086, олеиновой кислоты, вазелинового масла, сополимеров 2 и 3, полипропиленгликоля, асидол-мылонафта и дипроксамина 157.

Установлено, что исследуемые жидкости растекаются по поверхности алмаза со следующими краевыми углами: глицерин — 40° (0,7 рад); вода — 67° (1,1725 рад); диэтиленгликоль — 37° (0,6475 рад); этиленгликоль — 30° (0,525 рад); у остальных — 0° (0 рад). Наибольшая растекаемость наблюдалась у асидола — 230 см²/г (23 м²/кг); полипропиленгликоля — 210 см²/г (21 м²/кг); вазелинового масла — 175 см²/г (17,5 м²/кг). Исследование кинетики растекания показало, что наибольшую скорость растекания имеет асидол, меньшую — вазелиновое масло, сополимеры, касторовое масло.

Для оценки смазочных свойств абразивно-алмазных паст можно использовать специальный прибор [48]. В работе были изучены смазочные свойства паст в зависимости от наличия в них алмазного порошка. Опыты проводились на безалмазных пастах и с 1%-ным содержанием алмазных зерен. Показано, что смазочные свойства пасты с введением в нее алмазного порошка ухудшаются. Степень ухудшения зависит от состава неабразивной части пасты.

Повышение поверхностного натяжения и вязкости затрудняет подвод смазочного состава в зону обработки. Однако увеличение консистенции смазочного состава иногда необходимо для улучшения условий хранения состава, например доводочных паст. Для этого в смазочные масла или в другие жидкости вводят твердые наполнители (загустители), ограничивающие их текучесть. Тонкодиспергированные частицы загустителя образуют при этом пространственную сетку, ячейки которой удерживают смазочную жидкость не только механически, но и с помощью адсорбционных сил. Введение загустителя позволяет придать смазочной жидкости свойства пластичных тел, т. е. обеспечивается возможность получения определенной формы, например формы тюбиков при производстве паст, и т. д. Загуститель способствует сохранению равномерного распределения абразивного доводочного порошка по структуре пасты.

В качестве загустителей рекомендуются следующие материалы: церезин, петролатум, парафин, воск, некоторые полимеры, кальциевые, натриевые, литиевые, бариевые или алюминиевые мыла жирных кислот

(синтетических или натуральных) и некоторые неорганические соединения (силикагель, глина, сажа, производные мочевины и др.).

Эффективность использования паст и суспензий зависит от свойств их составляющих компонентов. В качестве общих количественных параметров, характеризующих свойства пасты и суспензий, могут быть использованы: 1) рецептура состава неабразивной части пасты (суспензии); 2) консистенция состава (условная твердость); 3) смазочность состава: растекаемость по абразивному и обрабатываемому материалам, а также вязкость (при различных температурах).

В качестве одной из количественных характеристик неабразивной части может использоваться температура каплепадения основы пасты. В работе [118] исследовалось влияние состава и вязкости паст на эффективность плоской доводки. Эксперименты проводились на двухдисковом станке типа SLZAZ 400 при скорости резания 38 м/мин, давлении 0,5 кг/см² (49,05 кн/м²); продолжительность доводки составляла 6 мин. Вязкость жидких компонентов пасты составляла 3,6; 7; 12; 37; 105 сст (3,6·10⁻⁴; 7·10⁻⁴; 1,2·10⁻³; 3,7·10⁻³; 1,05·10⁻² м²/сек). Плотность абразивных зерен изменялась от 0,08 до 1 г/см³. Образцы имели твердость HRC 63—64, а их средняя высота неровностей находилась в пределах 2—2,5 мкм.

Объем снимаемой стружки уменьшается с ростом вязкости. Поверхность образца, притираемого пастой большей вязкости, имеет кратерообразные углубления, размер которых примерно равен 1/3 первоначальной величины абразивных зерен. При меньшей вязкости на поверхности образца наблюдаются следы царапин, типичные для притирки. Объем срезаемой стружки также уменьшается с увеличением количества присадок в пасту. Шероховатость обработанной поверхности при увеличении вязкости пасты возрастала для каждой зернистости. Чем больше присадок в пасте, тем шероховатость меньше.

В работе [118] сделан вывод, что применяемые пасты должны иметь малую вязкость — 1—3 сст (1·10⁻⁴—3·10⁻⁴ м²/сек), а абразивные зерна — малую плотность — 0,1—0,2 г/см³.

Исследование влияния рабочей жидкости на производительность процесса показало [102], что изменение вязкости от 1,18 до 10,7 °E₂₀ при доводке твердых сплавов ВК6 и Т5К10 приводит к росту производительности почти в 2,5 раза, а при доводке стальных деталей носит горбообразный характер. Пик наибольшей производительности наблюдался при вязкости 2,25 °E₂₀.

Неабразивная часть паст и суспензий улучшает диспергирование и формирование обрабатываемой поверхности. Это связано со свойствами жидкостей, которые способны образовывать (адсорбировать) на этой поверхности различного рода пленки. Подобные свойства улучшаются с введением в состав жидкостей некоторых поверхностно-активных, обычно полярных веществ (ПАВ).

Действие жидкостей, содержащих ПАВ, на процесс срезания стружки различные авторы объясняют по-разному. Одни исследователи считают, что сопротивление металлов деформированию и разрушению понижается вследствие адсорбции или поверхностно-активных веществ смаз-

ки. Действие ПАВ заключается в том, что они облегчают выход наружу дислокаций и тем самым снижают энергию внешней поверхности металла. Эффект облегчения деформации становится значительным при определенной скорости деформации. По данным работы [119], эта скорость находится в интервале 200—300% в 1 мин. Уменьшение и увеличение скорости снижают этот эффект. При скорости 900% в 1 мин он равен нулю.

Наибольший эффект в направлении снижения сопротивления пластической деформации был получен [120] при введении в рабочий состав паст и суспензий подсолнечного масла, рыбьего жира и олеиновой кислоты; меньший — винного спирта и бензина и самый малый — скипидара и воды. ПАВ позволили увеличить производительность доводки в 2 раза и более. Оптимальной величиной добавки (в керосин) Мацунага считает 2,5% для олеиновой и стеариновой кислот и 7% для канифоли. Отметим, что оптимальное содержание олеиновой кислоты в пастах, применяемых на заводах ЧССР, колеблется в пределах 0—4, а стеарина — 17—20%. Для паст, применяемых у нас в стране, содержание этих компонентов составляет соответственно 4—35 и 4—30%.

Некоторые исследователи полагают, что ПАВ не оказывает влияния на протекание деформации. Так, И. М. Брозголь [121] считает, что основное назначение смазки при доводке заключается в том, чтобы предотвращать схватывания стружки и абразивных зерен, благодаря чему устраняется налипание стружки на поверхность инструмента. Им исследовано влияние смазочных жидкостей и ПАВ на производительность и качество обработанной поверхности при доводке колец подшипников абразивными лентами. Применение СОЖ вызывает резкое повышение производительности. Малый съем без СОЖ объясняется налипанием металла на абразивные зерна, из-за которого шкурка теряет работоспособность уже через 2 сек после начала работы. Известно, что для образования нароста при срезании стружки инструмент должен относительно детали пройти некоторый путь, длина которого определяется рядом факторов, таких, как скорость перемещения, материал детали, инструменты и т. д. Эксперименты по царапанию подшипниковой стали ШХ15 единичным абразивным зерном показали, что налипание стружки на поверхность зерна происходит после его перемещения относительно изделия на 5 мм. При наличии смазки налипания не наблюдалось.

Изменение вязкости не оказывает влияния на производительность доводки колец подшипника абразивной шкуркой № 10. В экспериментах использовались масла велосит, индустриальное 12, индустриальное 30, имеющие различную вязкость.

Повышение радиального давления от 8 до 16 кг/см² (от 748,8 до 1569,6 кн/м²) не оказывает заметного влияния на съем металла с детали. Дальнейшее увеличение давления до 24 кг/см² (2354,4 кн/м²) снижает съем металла. С изменением скорости доводки характер влияния давления на съем металла не изменяется. Добавление олеиновой кислоты способствует повышению съема металла, причем тем интенсивнее, чем больше давление. Степень влияния олеиновой кислоты на величину съема металла не зависит от скорости изделия. При доводке алмазной шкуркой

олеиновая кислота оказывает значительно меньшее влияние на увеличение съема металла с детали, чем при доводке абразивной шкуркой. Олеиновая кислота оказывает влияние на съем металла тем большее, чем больше размер зерен шкурки. При зернистости шкурки № 3 она не влияет на съем металла.

В результате И. М. Брозголь делает вывод, что ПАВ не облегчают пластическую деформацию поверхностного слоя. В противном случае они должны были бы оказывать влияние на величину съема при доводке с малыми давлениями, в одинаковой степени повышать съем при работе алмазными и абразивными шкурками с увеличением давления, размера зерен, что в действительности не имеет места.

Повышение производительности при механической доводке колец подшипника при применении олеиновой кислоты объясняется следующим. Вследствие повышения прочности смазочной пленки уменьшается количество зерен, производящих пластическое деформирование поверхностного слоя. При доводке абразивной шкуркой только небольшая часть зерен (8—12%) осуществляет резание. Основная часть зерен производит либо пластическое деформирование, либо упруго скользит по поверхности. По мере износа режущих зерен снятие стружки начинают осуществлять зерна, ранее производившие пластическую и упругую деформацию. Олеиновая кислота снижает износ зерен, находившихся ранее в стадии скольжения. Благодаря этому они имеют высокую работоспособность к тому времени, когда становятся режущими.

Существует также мнение, что при обработке металлов со снятием стружки решающая роль принадлежит химическим пленкам, образующимся при взаимодействии смазочной жидкости с обрабатываемым металлом. Попытаемся установить взаимосвязь между составом неабразивной части паст и суспензий (смазочных жидкостей) и свойствами образующихся на поверхности металлов поверхностных пленок. Основную роль в условиях граничного трения играет смазочное свойство применяемых масел и жидкостей, их способность образовывать масляные пленки. Известно [92], что смазочные пленки имеют высокую механическую прочность на разрыв и вытеснение и низкое сопротивление срезу. Высокая механическая прочность смазочной пленки позволяет предотвратить схватывание, уменьшить металлический контакт, а низкое сопротивление сдвигу снижает коэффициент трения. С повышением температуры и давления масла теряют свою смазочную способность.

Смазочные свойства различных масел могут быть улучшены искусственным введением в их состав различных полярных соединений: жирных кислот, спиртов и других длинноциклических соединений с полярной группой на конце. Такие полярные соединения улучшают смазочные свойства масел за счет способности образовывать на поверхности трения адсорбированные мономолекулярные слои, пленки.

Введение в масла поверхностно-активных веществ или химически активных присадок повышает контактную (критическую) температуру, при которой происходит схватывание металлов. Объясняется это тем, что при добавлении олеиновой, стеариновой и других жирных кислот к неполярному маслу на поверхности металла в результате химической

реакции образуется мыльная пленка, имеющая значительно более высокую температуру плавления, чем неполярные масла, жирные кислоты и ПАВ. Это и позволяет предотвратить схватывание тел не только при высоких, но и при низких температурах.

Взаимодействие смазочного материала с металлом осуществляется вследствие [117]:

- а) физической адсорбции (в основном за счет сил Ван-дер-Ваальса);
- б) поверхностных электрохимических реакций без образования самостоятельной хемосорбционной фазы;
- в) хемосорбции с образованием самостоятельной фазы.

Отличие хемосорбции от адсорбции заключается в следующем [122]:

1) энергетическое взаимодействие ПАВ и металла определяется энергией химических связей (ковалентной, координационной), электродонорно-акцепторным взаимодействием и т. д.;

2) при тепловой десорбции хемосорбированные молекулы с поверхности не удаляются, как это происходит при адсорбции;

3) растворение адсорбированного слоя с помощью растворителей не снимает хемосорбированную фазу;

4) молекулы химически связанного с металлом ПАВ не способны к адсорбции на другой поверхности, даже более активной.

Сложилось следующее представление о структуре образующихся на поверхности металла пленок. Поверхностно-активные молекулы полярного вещества, содержащиеся в неполярной среде масла, адсорбируются на металлической поверхности своими активными группами, а их углеводородные цепи образуют внешнюю поверхность. Образовавшийся смазочный слой представляет собой в силовом поле металла многослойную структуру, состоящую из мономолекулярной пленки с бимолекулярными наслоениями. Толщина слоя зависит от конкретных условий и может включать от нескольких до 400—500 молекулярных слоев (около 1 мкм). Смазочная способность такого слоя определяется устойчивостью его к действию нормальных и касательных напряжений. Чем больше сопротивление слоя действию нормальных напряжений и чем ниже к действию касательных напряжений, тем меньше коэффициент трения и больше его смазочная способность.

О природе пленки можно судить по величине энергии образования пленки, характеру сил взаимодействия металлической поверхности с активными молекулами окружающей среды. Сильное взаимодействие обусловлено силами валентных (химических связей), а слабое — межмолекулярными силами Ван-дер-Ваальса. Химическое (внутримолекулярное) взаимодействие отличается большой энергией связи. Физическое (межмолекулярное) взаимодействие проявляется на значительном расстоянии и характеризуется небольшими энергиями связи.

Смазывающие свойства пленок зависят от их строения, физических и химических свойств. Различают физические и химические жидкие и твердые сорбционные пленки. Более эффективны твердые пленки химической природы появления, характеризующиеся кристаллическим строением. Твердые пленки имеют следующие типы кристаллических связей: ионные, молекулярные, смешанные. В качестве примера твердых пленок со

структурой ионных кристаллов можно привести пленки галогенидов, сульфидов, сульфатов, фосфатов. Эти пленки появляются при использовании смазочных сред, содержащих хлор, серу, фосфор и др. Такую структуру имеют PbS , AgF , AgJ , $HgBr_2$, применяющиеся в качестве твердых смазок [123].

Молекулярную кристаллическую структуру имеют адсорбционные смазочные пленки жирных кислот, спиртов, эфиров, аминов и других полярных органических соединений. Эти кристаллы образованы при помощи слабых электростатических сил межмолекулярного взаимодействия — сил Ван-дер-Ваальса. В узлах такой кристаллической решетки находятся не отдельные атомы, или ионы, а целые молекулы, которые сохраняют свою индивидуальность и на ионы не распадаются.

П. А. Ребиндером исследовалась взаимосвязь между концентрацией активного компонента, степенью его химического сродства к смазываемой поверхности и верхним пределом температуры существования смазочной пленки. Изучая смазочное действие эфиров органических кислот, галондоорганических соединений, цианидов и нитропроизводных, растворенных в высокоочищенном масле, он установил, что температура, до которой сохраняется целостность смазочной пленки, связана с теплотой адсорбции следующей зависимостью [117]:

$$\ln C = -V/RT_n + K, \quad (67)$$

где C — концентрация полярного компонента; V — теплота адсорбции; R — газовая постоянная; T_n — температура начала разрушения смазочной пленки; K — постоянная величина.

Эксперименты показали, что величина T_n возрастает при повышении концентрации активного компонента до некоторого оптимального значения C_{opt} . Кроме того, она зависит от качества пленки, которое чаще всего определяется характером взаимодействия активного компонента с металлом. При срезании стружки или царапины металла образуется чистая ювенильная поверхность, атомы которой энергетически не уравновешены. Такая поверхность обладает во много раз большей способностью вступать в реакцию с окружающей средой, чем поверхность трущихся пар.

Для этих процессов смазочное свойство пленок теряет свою решающую роль. Таким свойством становится диспергирующее свойство пленок, т. е. способность пленок облегчать пластическую деформацию поверхностного слоя, а также химическое разрушение этого слоя. Для уяснения механизма этих свойств обратимся к величине энергии взаимосвязи доводочных паст — суспензий с обрабатываемой поверхностью. Схема основных энергетических взаимодействий в системе металл — доводочная паста — суспензия (вода + углеводородная среда + ПАВ + наполнитель) приведена на рис. 58.

В системе металл — вода — ПАВ — наполнитель — углеводородная среда возможны следующие электрохимические поверхностные реакции, являющиеся источником образования хемосорбционных пленок: катодный процесс восстановления органических ПАВ в кислой или в щелоч-

ной среде, некоторое восстановление радикалов в устойчивые углеводородные соединения, реакции анодного окисления органических соединений.

Энергия связи воды с металлом E_1 может изменяться в широких пределах. Она во многом определяется свойствами металла, а также свойствами и составом жидкой среды. Приведенные в гл. I составы использующихся в промышленности неабразивных частей паст и суспен-

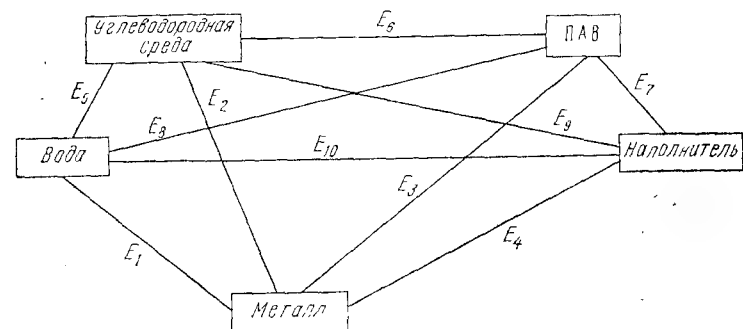


Рис. 58. Схема основных энергетических взаимодействий в системе металл — вода — смазочный материал, содержащий ПАВ и наполнитель (по Н. Н. Курчику, В. В. Вайнштоку, Ю. Н. Шехтеру)

зий можно разделить на следующие группы: 1) водные растворы органических и неорганических веществ; 2) эмульсии и растворимые масла (коллоидные дисперсии); 3) жидкие нефтепродукты, минеральные масла, жиры, синтетические жирозаменители; 4) пластичные (консистентные) смазки.

Вода на поверхности металла может удерживаться силами электронодонорного, электроноакцепторного (или электронодонорно-акцепторного) взаимодействия, водородной связью, силами Ван-дер-Ваальса. Энергия E_1 отсутствует при использовании безводного смазочного материала. Энергия E_2 связи углеводородной среды с металлом и энергия E_3 (связи ПАВ с металлом) зависят от природы сил взаимодействия молекул среды с атомами поверхности металлов и молекулами образующейся поверхностной пленки.

Различают ПАВ донорного, акцепторного и адсорбционного действия [124]. Облегчение пластической деформации, разрушение поверхностного слоя детали могут быть объяснены уменьшением энергии связи между положительными ионами кристаллической решетки зерен, расположенных в поверхностном слое, за счет воздействия ПАВ на свободные поверхностные электроны, осуществляющие эту связь. Одни ПАВ при этом воздействии уменьшают работу выхода электрона и увеличивают пластичность поверхности металла, другие увеличивают эту работу, образуя на поверхности твердые пленки.

Оценить физические и механические свойства хемосорбционной пленки можно, имея данные по общей поверхности энергии и работе выхода электрона. Работа выхода электрона может быть выражена через

свободную поверхностную энергию. Свободную **поверхностную** энергию определяем по формуле [117]

$$\sigma = \frac{\varphi z}{1,885 \cdot 10^{-3} R^2}, \quad (68)$$

где σ — свободная поверхностная энергия, эрг/см²; z — количество свободных электронов на один атом; R — атомный радиус, Å; φ — работа выхода электронов, эв. В свою очередь $\varphi = 0,232 W$, где W — энергия кристаллической решетки (полусумма первого и второго потенциала ионизации плюс теплота сублимации). Зная величину φ , можно определить энергию кристаллической решетки и поверхностную энергию металла.

По изменению работы выхода электрона с использованием ПАВ можно характеризовать их влияние на такой параметр, как нулевая точка металла. Для установления потенциала нулевой точки металла $E_{н.з}$ (точка нулевого заряда) обычно используют следующие зависимости:

$$E_{н.з} = -4,25 + 0,86\varphi, \quad (69)$$

$$E_{н.з} = \varphi \frac{1}{F}, \quad (70)$$

где F — константа Фарадея.

Связанное с адсорбцией ПАВ изменение **потенциала поверхности** металла определяют по формуле

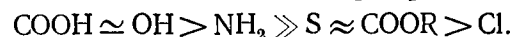
$$\Delta V = 4\pi n \mu \sin \alpha, \quad (71)$$

где ΔV — скачок потенциала; n — число молекул на единице поверхности металла; μ — дипольный момент ПАВ; α — угол наклона молекул ПАВ к твердой поверхности при их адсорбции.

Из формулы (71) следует, что большое влияние на энергетическое состояние поверхности оказывает дипольный момент ПАВ. Чем больше μ , тем больше ΔV , а следовательно, и изменение свойств смазочного материала.

В безводной масляной среде адсорбция и хемосорбция ПАВ возрастают с увеличением потенциала поверхности металла. Адсорбция же органических молекул из водных растворов или систем масло—вода возможна только при потенциалах, лежащих вблизи точки нулевого заряда данного металла. Степень хемосорбционного пластифицирования поверхностного слоя зависит от того, во сколько энергия связи частиц в пленке меньше энергии токов кристаллической решетки.

По склонности к адсорбционному пластифицированию ПАВ (органические кислоты, спирты и их эфиры, амины, сульфиды, хлориды) располагаются в следующей последовательности [117]:



Энергия связи углеводородной среды и ПАВ E_6 является сложной величиной. Для растворов ПАВ в углеводородной среде известно следующее правило: чем лучше растворимость ПАВ в данной среде, тем выше значение E_6 и, следовательно, хуже ПАВ адсорбируются на границе раздела среда — металл. Величина E_6 зависит от дисперсионного взаимо-

действия углеводородных радикалов ПАВ и среды, а также от других видов взаимодействия. Между ними образуются водородные связи, связи электронодонорно-акцепторного взаимодействия и химические координационные, которые обусловлены наличием в молекулах активных групп, заряженных частиц, радикалов, поляризованной воды (H^+ , OH^-) или других поляризующих веществ.

В зависимости от структуры вода оказывает на смазочный материал различное поляризующее действие. Диэлектрическая проницаемость обычной воды с тридемитной структурой равна 80, «идеальной» воды в отсутствие ассоциации молекул — 31. Диэлектрическая же проницаемость химически связанной воды примерно равна 2. Поэтому энергия связи E_5 и E_6 уменьшается при переходе от химически связанной воды к свободной.

На основе анализа данных о полярности и поляризуемости некоторых маслорастворимых ПАВ в работе [117] сделан вывод, что наиболее полярны жидкости, в молекулах которых содержится группа NO_2 , затем спирты, сложные эфиры со свободными группами OH .

Энергия связи ПАВ с водой E_8 во многом зависит от полярности и поляризуемости компонентов смазочного материала, энергия связи наполнителя с ПАВ E_7 , наполнителя с углеводородной средой E_9 и наполнителя с водой E_{10} и металлом E_4 — от типа и вида наполнителя, его гидрофильности и гидрофобности. Гидрофобные наполнители неорганического происхождения имеют высокое значение энергии связи с маслорастворимыми ПАВ (E_7) и малое с водой (E_{10}). Наполнители, растворяющиеся в воде, имеют высокую энергию связи с водой E_{10} и низкую с углеводородной средой. К таким наполнителям относятся используемые в качестве ингибиторов коррозии нитриты и хроматы щелочных металлов, водорастворимые органические соединения, имеющие в молекуле большое число гидрофильных полярных групп или сравнительно малые ее углеводородные части.

Механизмом удержания наполнителя в жидкой среде является сорбция ПАВ и воды на поверхностях наполнителей. Удерживание осуществляется за счет энергии двойного электрического слоя соответствующих электростатических и электрокинетических взаимодействий: дисперсионных сил взаимодействия среды и углеродных радикалов ПАВ и т. д. [117]. Если на частицах наполнителя ни вода, ни ПАВ не сорбируются, то силой, удерживающей наполнитель в углеводородной среде, является энергия E_9 связи его с этой средой. В этом случае, подчиняясь закону Стокса, частицы могут оседать. Для предотвращения осаждения наполнителей обычно используют межмицеллярную энергию связи. Для предотвращения выпадения дисульфида молибдена в водные суспензии вводят алкиларилсульфонаты, алкиленгликоли и другие водорастворимые ПАВ. Ингибиторы коррозии (нитрит натрия, капатин и др.) могут быть стабилизированы в жидких средах с помощью спиртов, эфиров, катионоактивных ПАВ, жирных кислот, различных восков, солей касторового масла и других веществ.

Наибольший эффект может быть получен при использовании мыльных загустителей. Если в качестве загустителя применяются мыла, обра-

зование адсорбционных пленок на поверхности металла и их характер зависят от концентрации загустителя в масле. При концентрациях больше 0,01 вес. % образуется пространственная структура, при этом энергия связи загустителя с абсорбционной пленкой оказывается больше, чем пленки с металлом. Это обеспечивает некоторое поверхностное пластифицирование металла и облегчение химического разрушения поверхности. Анализируя приведенные выше данные, можно отметить следующее.

1. Различные по своей природе и свойствам пленки могут обеспечивать как снижение, так и увеличение пластического деформирования и химического разрушения поверхностного слоя.

2. Наряду с ПАВ на качество пленок оказывают влияние углеводородная среда, наполнители и другие составляющие.

3. Наибольшее влияние на снижение пластической деформации оказывает величина дипольного момента ПАВ. Физические и механические свойства образующейся на металле адсорбционной пленки определяются не только полярностью состава, но и потенциалом поверхности металла, положением точки нулевого заряда металла.

4. Недостаток исследований по вопросу диспергирования не позволяет выявить количественную зависимость свойств пленок от состава паст и суспензий.

5. Одним из критериев эффективности диспергирования в определенных условиях является соотношение между толщиной пленки и толщиной снимаемого слоя металла. Чем толще снимаемый слой, тем меньше удельное влияние адсорбционной пленки, тем меньше доля пластифицирования и химического разрушения поверхностного слоя в общем процессе обработки. Поэтому подбор неабразивной части требует научного обоснования.

На основе анализа литературных данных по созданию паст и суспензий отметим следующее.

1. Водные суспензии и водорастворимые доводочные пасты в настоящее время обладают рядом недостатков, ограничивающих их широкое применение. Чаще всего могут быть созданы водные растворы неорганических солей в смеси с органическим ПАВ и наполнителями. Из органических ПАВ могут найти применение водорастворимые спирты, эфиры, амины и аминокислоты, неионогенные ПАВ ОП-7 и ОП-10, соли аминов, жирных и фосфорсодержащих кислот.

2. Основным представителем коллоидных дисперсий может служить раствор масла в воде или воды в масле. В такие составы, кроме воды и масла, необходимо вводить эмульгаторы — стабилизаторы коллоидной структуры и различные наполнители. В качестве эмульгатора и стабилизатора могут быть использованы ПАВ и в первую очередь аминокислотные вещества: мыла высших органических кислот (обычно насыщенных кислот жирного ряда C_{14} и выше), соли нафтенных, смоляных, сульфокислот алкилсерных и др. Свойства эмульсий в основном будут определяться способностью ПАВ к солюбилизации — поглощению ядром мицеллы ПАВ одной из жидкостей, имеющей сродство с одной частью молекулы ПАВ, которая образует это ядро.

3. Анализ авторских свидетельств по СОЖ, применяемой при обработке металла резанием, показывает, что в качестве эмульгаторов в настоящее время используют канифоль, мылонафт, окисленный петрола-гум, спирты, гликоли, касторовое масло, растительные масла, неионогенные ПАВ (оксигетилированные соединения: фенолы, алкилфенолы, жирные кислоты, амины), соли аминокислот и жирных кислот, полиаминов и синтетические жирные кислоты фракций $C_1—C_7$, сочетание неионогенных и анионоактивных эмульгаторов (смесь неионогенных ПАВ с сульффонатами, аминами и солями жирных кислот) и т. д. К этому же ряду смазочных составов можно отнести доводочные пасты, у которых в качестве эмульгатора использованы хозяйственное мыло и оксигетилированный алкилфенол и другие вещества.

4. Кроме того, в качестве неабразивной части паст могут быть использованы консистентные смазки (например, солидол, констаин), алюминиевые и т. д.

К следующей большой группе факторов, влияющих на доводку, можно отнести параметры, характеризующие режим доводки.

Влияние давления и скорости. На эффективность процесса доводки значительное влияние оказывает удельное давление. В диапазоне давлений до $1,5—2 \text{ кг/см}^2$ ($147,15—196,2 \text{ кн/м}^2$) съем металла при плоской доводке изменяется пропорционально давлению. При дальнейшем увеличении давления рост производительности замедляется, и при давлении $2,5—3 \text{ кг/см}^2$ ($245,25—294,3 \text{ кн/м}^2$) может даже наблюдаться некоторое снижение ее. Поэтому в процессе доводки необходимо поддерживать оптимальную величину давления.

А. В. Черников [125], исследуя производительность процесса плоской доводки, вывел следующую зависимость величины снимаемого припуска от параметров процесса:

$$Q = cVptk, \quad (72)$$

где Q — величина снимаемого припуска; c — коэффициент, учитывающий обрабатываемость материала; p — удельное давление, кг/см^2 ; t — время, сек ; k — коэффициент, зависящий от режима доводки; V — скорость доводки.

Из формулы (72) следует, что с увеличением скорости доводки величина снимаемого припуска возрастает. И все же, используя эту формулу, трудно ответить на вопросы о том, какой из факторов оказывает наибольшее влияние на производительность и каково их взаимное влияние.

Исследуя процесс доводки наружной поверхности вала, П. Д. Дудко [126] считает, что для повышения производительности доводки и достижения высокого качества обрабатываемой поверхности при предварительной доводке необходимо применять скорость $50—75 \text{ м/мин}$, а при окончательной — 25 м/мин . Подобные рекомендации имеются и в работе [57]. Отмечается, что при доводке отверстий диаметром $6—10 \text{ мм}$ в закаленных стальных деталях скорость доводки на предварительных операциях должна быть $50—100 \text{ м/мин}$, а при окончательных — $10—20 \text{ м/мин}$.

По вопросу о влиянии скорости доводки имеются и другие мнения. Например, С. М. Кедров [102] установил, что увеличение скорости доводки от 8 до 12 м/мин заметного влияния на съём металла не оказывает. Б. С. Коршунов для получения 11-го класса шероховатости во втулке плунжера рекомендует применять скорость 4—6 м/мин. Наши исследования этих параметров применительно к доводке отверстий приведены ниже (см. гл. VI).

Вопросу регулирования и поддержания необходимого удельного давления при отделочной обработке деталей другими абразивными инструментами также уделено большое внимание.

М. С. Наерман и С. А. Попов [127], рассматривая процесс хонингования, подчеркивают необходимость регулирования величины давления на абразивные бруски в процессе обработки. Вначале, когда площадь соприкосновения брусков с деталью из-за значительной шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия мала, давление должно быть меньше, а по мере возрастания площади контакта его необходимо увеличивать до оптимальной величины и поддерживать до окончания процесса.

Глава V

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРИ ТОНКОЙ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ

1. Качество и эксплуатационные свойства поверхностного слоя

Качество поверхности характеризуется следующими основными параметрами:

1) геометрией поверхности: микрогеометрией по ГОСТ 2789—73; степенью остроты впадин и выступов микронеровностей; волнистостью; макрогеометрией;

2) структурой поверхностного слоя: кристаллическим строением; наличием макро-, микро- и субмикродфектов; наличием окисных пленок, обезуглероженным слоем, слоем, обедненным легирующими элементами; наличием структурных превращений в поверхностном слое (закалка, отпуск, дисперсионное твердение).

3) степенью деформации металла в поверхностном слое: деформацией внутри отдельных зерен; деформацией совокупности зерен (по слоям);

4) наклепом поверхностного слоя: глубиной наклепа; степенью наклепа и распределением ее по глубине; наличием в поверхностном слое чрезмерно наклепанного металла с частично разрушенной кристаллической решеткой;

5) остаточными напряжениями: знаком напряжений; величинами остаточных напряжений и распределением их по глубине; соотношением между остаточными напряжениями 1, 2, и 3-го родов, а также между тангенциальными осевыми и нормальными напряжениями;

6) прочими параметрами (оптическими, магнитными, электрическими, адгезионными).

Новый стандарт на шероховатость поверхности (ГОСТ 2789—73) в отличие от применявшегося ранее для оценки и нормирования шероховатости поверхности устанавливает шесть параметров (вместо двух по предшествующему стандарту) и шесть типов направлений неровностей поверхности (параллельное, перпендикулярное, перекрещивающееся, произвольное, кругообразное, радиальное).

Параметры шероховатости поверхности следующие (рис. 59):

R_a — среднее арифметическое отклонение профиля:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

или приближенно

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|;$$

R_z — высота неровностей профиля по десяти точкам:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i_{\max}}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i_{\min}}| \right)$$

или

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{i_{\max}} - \sum_{i=1}^5 h_{i_{\min}} \right);$$

$R_{\max}$ — наибольшая высота неровностей профиля; S_m — средний шаг неровностей; S — средний шаг неровностей по вершинам; t_p — относительная опорная длина профиля, где p — числовое значение уровня сечения профиля (принимается в % от $R_{\max}$).

Шероховатость поверхности определяется как высотой микронеровностей, так и их формой, шагом неровностей, площадью опорной поверхности, числом выступов и впадин, приходящихся на единицу площади. Именно форма микронеровностей совместно с их высотой, а не только высота определяют важнейшие эксплуатационные свойства поверхностей и в первую очередь их прирабатываемость, износостойкость, противозадирные свойства, контактную жесткость и усталостную прочность, сопротивление ползучести, коррозию и многие другие явления. Поэтому в новый стандарт на шероховатость поверхности, помимо высотных, включены две шаговые характеристики: относительная опорная длина, а также направления микронеровностей. Новый стандарт регламентирует параметры: $R_a = 100\text{--}0,008 \text{ мкм}$; $R_z, R_{\max} = 1600\text{--}0,25 \text{ мкм}$; S_m и $S = 12,5\text{--}0,002 \text{ мкм}$; $t_p = 10\text{--}90\%$; $l = 0,01\text{--}25 \text{ мм}$. Требования по шероховатости определяются по одному или по нескольким параметрам. Для 6—12-го классов основная шкала R_a , а для 1—5, 13 и 14-го классов — шкала R_z . В исследовательской практике наиболее широко используется шкала R_z .

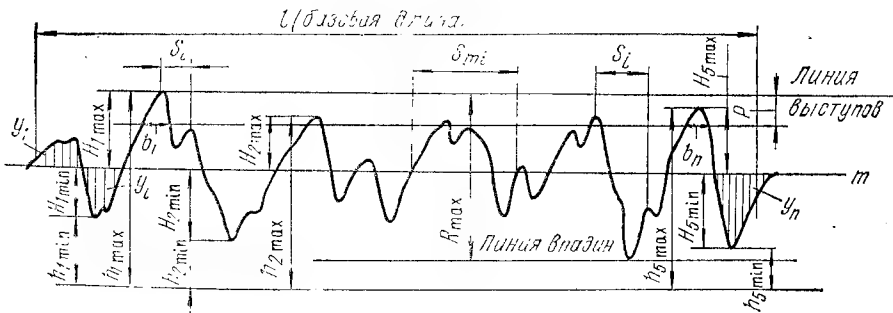


Рис. 59. Профилограмма поверхностных неровностей

Высокие эксплуатационные свойства деталей машин обеспечиваются лишь при оптимальном микрорельефе их поверхностного слоя. Управление микрорельефом, формой микронеровностей поверхности — в настоящее время одна из самых актуальных проблем тонкой финишной обработки. В отдельных случаях оптимальный микрорельеф поверхности на окончательно обработанной с заданной точностью детали может быть получен вибрационным обработыванием.

До недавнего времени специалисты в области машиностроения считали, что качество рабочих поверхностей деталей машин, а следовательно, их надежность и долговечность зависят от методов и условий выполнения последней операции, завершающей процесс механической обработки [128]. Тем самым недооценивалась возможность влияния результатов предшествующих операций на эксплуатационные свойства готовых деталей. В настоящее время в результате проведенных исследований [103, 128—130 и др.] выявлена ошибочность такого мнения и установлено существование технологической наследственности при формировании основных эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин.

Для обеспечения оптимальной долговечности и надежности работы деталей необходимо придавать их обработанным поверхностям наивыгоднейшие геометрические характеристики и физико-механические свойства. Поэтому понятно, что на эксплуатационные свойства деталей основное влияние оказывают точность их изготовления, шероховатость рабочих поверхностей, марка материала, его структура и твердость.

Относительно шероховатости в прошлом полагали, что важно обеспечить заданный чертежом класс шероховатости независимо от способа или метода ее получения. Однако оказалось, что такой подход к оценке качества и эксплуатационных свойств обработанных поверхностей неверен. Исследования показывают, что одинаковые по точности и шероховатости поверхности детали машин, но обработанные различными методами имеют и различные эксплуатационные свойства. Это объясняется тем, что шероховатость сама по себе не может характеризовать физическое состояние поверхностного слоя металла. У поверхностей с одинаковой конечной шероховатостью могут быть различные степени наклепа, характер и величина остаточных напряжений, степень искажения кристаллического строения и степень нарушения целостности поверхности за счет микротрещин, надиров, разрыхления и т. д. Различными могут быть химический состав и структура поверхностного слоя металла. Если поверхность получена в результате комплекса механических операций с выделением в зоне резания значительного количества тепла, то отдельные химические составляющие могут выгорать и металл в очень тонком слое становится обедненным, что снижает его эксплуатационные свойства.

Важная характеристика эксплуатационных свойств обработанной поверхности — ее поверхностная энергия. Внутренние частицы твердого тела окружены со всех сторон соседними. Частицы, находящиеся на поверхности, окружены «соседями» только с одной стороны, поэтому они расположены иначе, чем внутренние. В поверхностном слое сосредоточен

больший запас потенциальной энергии, чем во внутренних слоях. Для перевода внутренних частиц на поверхность, т. е. для образования новой поверхности, потребуется затратить определенную работу. Работа, необходимая для образования единицы новой поверхности, называется поверхностной энергией [131].

Сгущение энергии на поверхности объясняется тем, что действующие на молекулу внутри твердого тела молекулярные силы со стороны «соседей» взаимно компенсируются и дают равнодействующую, равную нулю. В поверхностном слое такой компенсации нет, и на поверхностные молекулы действуют силы, направленные внутрь. Эти силы компенсируются сжатием поверхностного слоя (в итоге он оказывается упруго сжатым), что вызывает сгущение энергии. Чем выше микротвердость детали, тем больше ее поверхностная энергия. Но поскольку микротвердость поверхности на финишной операции зависит от условий выполнения не только данной операции, но и предыдущей, то можно считать, что на конечное значение поверхностной энергии в какой-то мере влияет и предыдущая операция.

Для поверхностей с равной шероховатостью, но обработанных с применением различных технологических методов величины поверхностных энергий будут неодинаковыми, а следовательно, разными окажутся и эксплуатационные свойства. Данная точка зрения подтверждается рядом исследований. Так, например, в работе [129] показано, что при одинаковой точности и шероховатости трущихся поверхностей суперфинишированных валов и втулок износостойкость последних различна и зависит от способа их обработки. При шероховатости 10-го класса наименьший износ получается у шлифованных втулок. Для случая обработки по 11-му и 12-му классам шероховатости наименьший износ оказался у хонингованных втулок.

А. А. Маталин [129] приводит следующие результаты экспериментов. Различными способами обрабатывались плоские детали по 10-му классу шероховатости. Материал — закаленная сталь У8А. Оказалось, что детали, шлифованные керамическим абразивным кругом, за 10 час сухого трения при давлении 1 кг/см^2 ($98,1 \text{ кн/м}^2$) дали наименьший износ. Такие же детали, обработанные доводкой свободным абразивом или шлифованные кругом с графитовым наполнителем, при прочих равных условиях имели износ, на 37% больший.

По данным П. Н. Романова, снижение шероховатости на рабочих дорожках шариковых подшипников с 8-го до 9-го классов увеличивает их долговечность в 4 раза, с 9-го до 10-го — в 2 раза, с 10-го до 11-го — на 20%. Оптимальной шероховатостью следует считать 10—11-й классы, так как дальнейшее уменьшение микронеровностей не вызывает заметного повышения долговечности. Приведенный пример показывает, что эксплуатационные свойства определяются всей гаммой приведенных выше параметров качества, а не одним из них. Если бы долговечность подшипников определялась только шероховатостью их, то изменение долговечности строго соответствовало бы изменению шероховатости поверхности. Подобное расхождение между шероховатостью и износостойкостью установлено в работе [132]. Изучалось влияние методов отделочной обработ-

ки на сопротивление поверхностного слоя изнашиванию при качении, влияние состояния поверхностного слоя на контактную усталость при качении шара по цилиндру. Испытания проводились на машине, воспроизводящей качение шара по цилиндру из стали ШХ15. Диаметр цилиндрического образца $30 \pm 0,1 \text{ мм}$, шара 30 мм. Результаты измерения ширины h (мм) дорожки качения шара по цилиндру и биения δ (мкм) этой дорожки приведены в табл. 40.

Анализ таблицы показывает, что зависимость ширины дорожки качения от вида отделочной обработки и шероховатости поверхности носит весьма сложный характер. Это связано с тем, что качество поверхностного слоя не может быть определено только высотой микронеровностей. Основные эксплуатационные свойства поверхности, т. е. ее микро- и макрогеометрия, микротвердость, напряженное состояние, наклеп, поверхностная энергия, цельность поверхности, химический состав, структура тончайших наружных слоев металла и др., формируются на протяжении всего периода обработки деталей. Отдельные свойства и характеристики переходят от операции к операции. Они как бы «унаследуются» от предыдущих операций. Следовательно, можно сказать, что при механической обработке деталей имеет место технологическая наследственность.

В технологическом комплексе первые операции обычно влияют слабее, чем финишные, но все же их влиянием пренебрегать нельзя [128]. Оказывается, что сила воздействия каждого технологического фактора на конечные эксплуатационные свойства обработанных деталей неодинакова: влияние одних распространяется вплоть до самой последней операции, а других угасает значительно раньше. В технологической цепочке существуют своего рода «барьеры». Некоторые факторы преодолеть эти «барьеры» не могут, поэтому на конечные свойства обработанных поверхностей они не влияют; другие факторы все же проходят эти «барьеры», при этом они значительно теряют силу и влияют на конечные свойства очень слабо.

Определенные эксплуатационные качества будущей готовой детали закладываются при выборе температурного интервала штамповки и поковки. Если при этом создана неблагоприятная структура, то, как бы точно ни были обработаны детали при соответствующем классе шероховатости поверхностей, они будут иметь низкие физико-механические свойства и, следовательно, малую долговечность и надежность.

Существенными «барьерами» являются термические и так называемые упрочняющие операции, сопровождающиеся поверхностным наклепом деталей. Технологические факторы, вызванные металлургическим процессом и при выполнении кузнечно-штамповочных операций, проходят в дальнейшем всю технологическую цепочку операций и оказывают сильное влияние на формирование окончательных характеристик обработанных поверхностей, а следовательно, на усталостную прочность деталей и их износостойкость. На свойства готовой детали влияют не только кузнечно-штамповочные, но и операции дозакалочной механической обработки. Это значит, что тот или иной вид обработки сырых деталей определяет свойства их поверхностей, получающиеся в результате последующей закалки этих деталей.

Влияние вида отделочной обработки на некоторые эксплуатационные параметры

Вид обработки	Нагрузка		Шероховатость, $\mu\text{м}$	Число циклов $\cdot 10^4$											
				0,01		0,03		0,1		0,2		1,0		5,0	
				h	δ	h	δ	h	δ	h	δ	h	δ	h	δ
Суперфиниширование	25	245, 25	0,045	0,68	30	0,75	20	0,76	15	0,79	15	0,78	15	0,89	20
	50	490, 50	0,052	0,89	16	0,94	16	0,95	14	0,95	14	—	—	1,00	6
Микрошлифование	25	245, 25	0,055	0,65	—	0,68	—	—	—	0,77	—	—	—	0,83	—
	50	490, 50	0,050	0,90	16	0,94	16	0,95	14	0,96	12	—	—	1,08	8
Обработка шкуркой М28	25	245, 25	0,070	0,66	30	0,66	30	0,72	25	0,76	25	0,88	25	0,87	20
Электрополирование	25	245, 25	0,140	0,77	16	0,76	14	0,76	10	0,75	10	0,84	32	1,08	10
	25	245, 25	0,880	—	—	—	—	—	—	—	—	0,71	12	—	—
Шлифование	50	490, 50	0,880	—	—	—	—	—	—	—	—	0,85	6	—	—
	100	981, 00	0,880	—	—	—	—	—	—	—	—	1,27	8	—	—

В работе [130] установлен механизм влияния технологической наследственности на микроструктуру и упрочнение поверхности закаленных деталей, прошедших предварительную (сырую) механическую обработку. Отмечено интересное явление, заключающееся в том, что закалка деталей после их механической обработки неизбежно приводит к возникновению под поверхностью ослабленного слоя металла с пониженной твердостью и с крупными иглами мартенсита (или других структур распада аустенита). В экспериментах [130] во всех образцах после закалки максимальная микротвердость металла была на поверхности, затем она снижалась и на расстоянии 100—250 $\mu\text{м}$ имела минимум (снижение на 14—17%). После этого она вновь поднималась до значения твердости глубинной зоны. Характерно, что минимальная микротвердость совпадает с переходной зоной, где происходит самое интенсивное укрупнение зерен аустенита при нагреве с последующим образованием здесь крупно-гольчатого хрупкого мартенсита.

Явление снижения микротвердости под поверхностью закаленных деталей нужно учитывать, если детали после закалки не шлифуются, а проходят лишь очень тонкую доводочную операцию. При ее выполнении удаляются более твердые субповерхностные слои металла, в связи с чем готовая деталь приобретает рабочую поверхность с меньшей твердостью, а следовательно, с пониженной работоспособностью.

В закаленных низкоотпущенных сталях всегда сохраняется некоторое количество остаточного аустенита, который, как известно, пластичен. Поэтому при абразивной обработке таких деталей скопление дислокаций будет сосредоточиваться главным образом в аустенитной среде, где легко будут образовываться микро- и макротрещинки. Следовательно, неудачное проведение термических операций обуславливает наличие повышенного процентного содержания остаточного аустенита, способствующего нарушению целостности поверхности при механической обработке. Если же деталь с повышенным содержанием остаточного аустенита подвержена циклическому воздействию контактных нагрузок, первичная микропластическая деформация будет протекать именно в зернах остаточного аустенита. Но поскольку пластичность аустенита выше, чем мартенсита, то пластическая деформация начнется в объемах остаточного аустенита, которые, действуя как геометрические концентраторы напряжений, будут способствовать снижению прочности.

В работе [133] отмечается, что наличие остаточного аустенита в деталях, работающих в условиях циклических контактных напряжений, особенно нежелательно. Остаточный аустенит при распаде переходит в мартенсит, в связи с чем изменяются размеры детали и происходит ее коробление. Но наибольший вред заключается в снижении контактной прочности и в склонности к зарождению первичных усталостных трещин.

Нашими исследованиями [90], а также исследованиями [133, 134 и др.] установлено, что при шлифовании стали ШХ15 и других высоколегированных закаленных сталей часто образуются две качественно различные зоны структурного состояния — зона вторичной закалки, имеющая аустенитно-мартенситную структуру, металлографически проявляющуюся в виде слаботравящегося белого слоя, и нижележащая зона

повышенной травимости со структурой скоростного высокотемпературного отпуска, состоящая из феррита, остаточного аустенита и цементита. Белый слой на поверхности детали имеет повышенную (по сравнению с основным металлом) твердость — около $750\text{--}1170 \text{ кг/мм}^2$ ($7357,5\text{--}1147,77 \text{ Мн/мм}^2$) и повышенную хрупкость. Данный слой образуется на мартенситном основании и прочно на нем удерживается, увеличивая износостойкость деталей. Наименьшая твердость зафиксирована в зоне отпуска. Твердость в глубинных слоях металла выше, чем в зоне отпуска, но ниже, чем в белом слое. Указанные зоны чаще всего образуются в результате фазовых превращений. Особенность этих превращений заключается в том, что они протекают при высоких температурах с одновременным осуществлением пластических деформаций под большим давлением. Скорости нагрева и охлаждения поверхностных слоев на несколько порядков превышают аналогичные скорости при обычной термической обработке и составляют $10^5\text{--}10^6$ и $10^3\text{--}10^4 \text{ град/сек}$ [135].

Причины слабой травимости белого слоя различные исследователи объясняют по-разному. Многие исследователи связывают это явление с фазовым составом этого слоя. Так, например, в работе [136] отмечается, что слабая травимость слоев мартенситного типа объясняется особым бесструктурным состоянием мартенсита.

К основным отличиям белого слоя от структуры обычной закалки следует отнести повышенное количество в нем остаточного аустенита (до 80%) и увеличенное значение параметра его кристаллической решетки.

Для изучения фазового состава в глубине металла после различных методов обработки был использован [137] метод послойного анализа. С деталей электрическим полированием снимались слои толщиной 1, 3, 30, 50, 100 и 250 мкм. После удаления каждого слоя снималась рентгенограмма и производилась ее расшифровка. Установлено, что слой с повышенным содержанием аустенита для шлифованных деталей имеет толщину 10 мкм, ниже располагается переходный слой толщиной 100 мкм, постепенно переходящий в исходную (глубинную) структуру. У полированных деталей измененный слой составляет всего 3, а переходный — 50 мкм.

Выше отмечалось, что большое процентное содержание остаточного аустенита усиливает тенденцию к образованию в нем микротрещин, которые во время контактной циклической нагрузки постепенно превращаются в усталостные выкрашивания. Поэтому на финишных операциях (при тонком шлифовании, полировании или суперфинише) белый слой следует удалять. Это относится, например, к деталям подшипников качения. Если же детали работают не на контактную усталость, а на истирание, то для увеличения их износостойкости белый слой желательно не удалять.

Поскольку микротвердость и другие физико-механические свойства шлифованных деталей существенно изменяются в направлении от поверхности в глубь металла, то на последующих более тонких операциях в зависимости от снимаемого припуска можно получить самые различные конечные результаты. Так, например, если при полировании снимается недостаточный припуск, то обработанная поверхность может ока-

заться расположенной в зоне отпуска, где твердость наименьшая, при этом будет снят слой с повышенной твердостью и обнажится слой с пониженной. Из рис. 60 видно, что кривая 1 на участке АВ располагается немного выше кривой изменения микротвердости шлифованной закаленной детали (штриховая линия). Это объясняется наклепом, возникающим при полировании. Здесь был снят небольшой припуск, всего лишь 7 мкм на сторону. При съеме такого же припуска с помощью суперфиниша поверхностная твердость выше, чем при полировании (кривая 2). Это

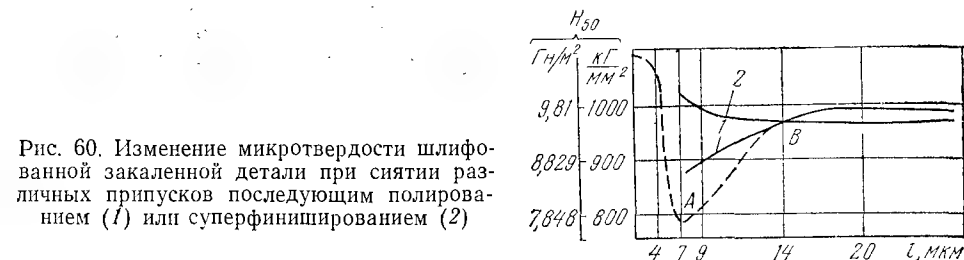


Рис. 60. Изменение микротвердости шлифованной закаленной детали при снятии различных припусков последующим полированием (1) или суперфинишированием (2)

объясняется тем, что суперфиниширование всегда протекает в режиме резания и сопровождается более интенсивным наклепом металла. Полирование же протекает в режиме резания, автоматически переходящем в режим выглаживания поверхности, а выглаживание сопровождается меньшим наклепом.

Таким образом, физико-механические свойства поверхности, обработанной на финишных операциях, зависят от состояния структурно-измененного слоя, созданного на предыдущей (шлифовальной) операции. Наибольшая допустимая исходная шероховатость, после шлифования которой получается удовлетворительная поверхность, — шероховатость, соответствующая 3—4-му классам [128].

Отдельные глубокие царапины или остаточные шлифовочные риски при измерении шероховатости с помощью профилометров не могут заметно изменить ее численное значение. Тем не менее отдельные царапины, являясь геометрическими концентраторами напряжений, существенно снижают физико-механические свойства поверхности, в частности могут быть причиной усталостного выкрашивания металла.

Для устранения возможности ухудшения эксплуатационных свойств полированных поверхностей необходимо обеспечить достаточный съем металла при полировании (примерно 25 мкм на диаметр). При этом гарантируется полное удаление шлифовочных рисков, если исходная шероховатость была 7—8-го классов.

Как известно, любой процесс резания, каким бы тонким он ни был, сопровождается пластическим деформированием обработанной поверхности, т. е. наклепом. Наклепанная зона, созданная при выполнении предыдущих операций, обычно распространяется глубже слоя металла, предназначенного для удаления на финишных операциях. В период осуществления тонкой обработки удаляются лишь наиболее интенсивно наклепанные слои, а значительная часть наклепа все же остается. Таким

образом, происходит взаимодействие предыдущего и вновь созданного наклепов. При указанном взаимодействии наклепов некоторые ранее существовавшие микротрещины на выполняемой в данный момент операции закрываются («залечиваются»), а некоторые (в меньшем количестве) образуются вновь.

При поверхностном пластическом деформировании металла имеет место искажение его кристаллической решетки. Под действием деформирующей силы происходит сдвигообразование одного слоя атомов относительно другого. На элементарных участках, где искажения кристаллической решетки достигли предельной величины, при дальнейшем доп.полнительном искажении в том же направлении, вызванном даже финишной операцией, могут возникнуть микротрещины. Поэтому нарушение целостности обработанной поверхности во многом зависит от характера и направления имеющихся и вновь образовавшихся кристаллических сдвигов.

При одинаковом направлении сдвигов микронарушения поверхностного слоя усиливаются, и, наоборот, при несовпадающих направлениях микротрещины более интенсивно будут закрываться (смыкаться). Отсюда вытекает важный практический вывод: где возможно, необходимо осуществлять технологический процесс таким образом, чтобы последовательно выполняемые шлифовальные, доводочные и полировальные операции выполнялись не в одном (совпадающем) направлении движения режущих элементов относительно обрабатываемой поверхности, а в противоположных или в пересекающихся. В этом отношении предпочтительнее операции хонингования, суперфиниширования, при которых на обработанной поверхности образуется «сетка», представляющая собой след перекрещивающихся траекторий движения абразивных зерен. При такой обработке поверхность получается более цельной, с меньшей степенью разрыхления и нарушения правильного кристаллического строения. Поэтому и при полировании абразивным полотном наряду с основным следует сообщать поперечные осциллирующие движения. При шлифовании и доводке шариков для подшипников качения траектории движения зерен пересекаются.

Исследованиями [90, 133 и др.] установлено, что финишные абразивные операции протекают с тенденцией образования остаточных напряжений сжатия. Это объясняется малым выделением тепла в зоне резания.

При предварительной обработке, например шлифовании на форсированных режимах, тепловые процессы довольно значительны, поэтому в поверхностном слое обычно образуются растягивающие напряжения. Экспериментальные исследования показывают, что поверхностные напряжения сжатия повышают предел выносливости, а напряжения растяжения снижают его. В работе [129] отмечается, что остаточные напряжения сжатия в большей мере повышают предел выносливости, чем снижают его такие же по величине остаточные напряжения растяжения.

Итак, при выполнении полного комплекса технологических операций в поверхностных слоях происходят сложные процессы взаимодействия имеющихся и вновь созданных зон наклепов, эпюр напряжений, образования и закрытия микротрещин, изменения химического состава, структуры

металла и т. д. Через указанные процессы проявляется связь физико-механических свойств, созданных в поверхностных слоях на предшествующих операциях (начиная с первой), с физико-механическими свойствами, формирующимися во время выполнения последующих операций. Другими словами, пооперационное взаимодействие состояний поверхностного слоя есть не что иное, как проявление технологической наследственности при механической обработке деталей машин.

На качество поверхностного слоя оказывают влияние абразивные и алмазные зерна, остающиеся в нем во время доводки. Наибольшей способностью к внедрению обладают алмазные зерна. Толщина слоя, насыщенного алмазами, зависит от зернистости алмаза и рода материала детали. Зерна АСМ 1/0 — АСМ 2/1 внедряются на глубину до 0,5 мкм, а зерна АСМ 40/28 — до 4 мкм. С увеличением времени доводки число частиц на обработанной поверхности снижается. Зерна, оставшиеся в поверхности детали, обычно располагаются во впадинах или на кромках отдельных глубоких рисок. Наряду с большими зернами значительное количество внедренных частиц имеет размеры 200—500 Å (20—50 нм). Сравнение размеров частиц со средней высотой микронеровностей микрорельефа поверхности показывает, что они могут быть и больше, и меньше высоты микронеровностей R_z .

Для обнаружения частиц зерен абразива на обработанной поверхности известно несколько методов: метод перемещения детали по оптически плоскому стеклу и царапание его оставшимися в детали зернами, метод тонкой стружки, метод электрополирования, рентгеноспектральный анализ и др. Недостаток этих методов в том, что они дают ответ лишь на вопрос, присутствуют ли зерна на обработанной поверхности; определить же количество зерен, приходящихся на единицу площади детали, размеры и характер их расположения с помощью этих методов затруднительно. Для удаления внедренных в поверхность детали абразивных и алмазных зерен обработанные детали подвергают механической очистке и мойке в специальной моющей среде. Чтобы обеспечить высокое качество поверхностного слоя, необходима не только хорошая моющая среда, но и строгое соблюдение технологии доводки. При некоторых нарушениях процесса доводки в детали могут оставаться зерна, которые в процессе мойки удалить нельзя.

Эксплуатационные свойства и качество окончательно обработанной поверхности детали могут быть улучшены с помощью методов немеханической обработки. Известен, например, способ повышения качества поверхностного слоя деталей нанесением на нее смазки, содержащей дисульфид молибдена MoS_2 и др. Дисульфид молибдена, имеющий слоистое строение, дает положительный эффект только при правильном применении его. Однако эффективный способ нанесения этого порошка еще не найден.

Одним из новых способов нанесения MoS_2 на рабочую поверхность деталей может служить безабразивная притирка (полирование) пастами, содержащими MoS_2 . Притирка может осуществляться чугуном притиром с использованием жидкой среды следующего состава: MoS_2 (1/3 по весу), порошкообразная сера (1/3), жидкое масло — остальное.

Жидкая среда для полирования состоит из следующих компонентов (вес. %): сера — 50; MoS_2 — 10; жирная кислота — 2; машинное масло — остальное. Во многих случаях очень качественная поверхность достигается при непосредственной притирке (приработке) сопряженных деталей с использованием приведенных составов.

2. Износостойкость, точность и качество поверхности плоских деталей при абразивной доводке

Для оценки износостойкости доведенных плоских деталей образцы с различной шероховатостью испытывались на машине трения [138]. Детали из стали 40X ($\text{HRC } 40$) с доведенной поверхностью торцов ($\varnothing 10 \text{ мм}$) устанавливались на диск, который вращался со скоростью $4,5 \text{ м/сек}$. В зону контакта для создания условий граничного трения подавалось масло МС-20 по 110 мг/мин . Исследовалась зависимость шероховатости, получаемой после доводки плоских поверхностей, и ее износостойкости от зернистости абразивных зерен и применявшегося в процессе обработки давления зерен. Результаты этих исследований представлены на рис. 61.

Анализ полученных данных показал, что поверхность с меньшей шероховатостью имеет меньшую износостойкость в том случае, если уменьшение шероховатости достигнуто в результате повышения давления в зоне обработки. Поверхности с малой шероховатостью имеют большую износостойкость в том случае, если уменьшение ее достигнуто применением абразива меньшей зернистости. Наибольшей износостойкостью обладают поверхности, полученные при минимальных давлениях притира $0,3\text{—}0,5 \text{ кг/см}^2$ ($29,43\text{—}49,05 \text{ кН/м}^2$). Такие поверхности имеют характерный точечный рельеф и матовый цвет в отличие от блестящих поверхностей с продольными прямолинейными следами обработки, получаемых при доводке с большим давлением в зоне обработки — $1,5\text{—}1,9 \text{ кг/см}^2$ ($147,15\text{—}186,39 \text{ кН/м}^2$).

Изменение давления в процессе доводки приводит к изменению внешнего вида поверхности и ее физико-механических свойств. Данные, характеризующие изменения некоторых физических свойств обработанной поверхности с изменением давления, приведены в табл. 41. С ростом давления разрушается поверхностный смазочный и охлаждающий слой, увеличивается нагрузка на срезаемый слой металла, что ведет к выделению тепла и разупрочнению поверхности детали.

В проведенных экспериментах увеличение давления от $0,3$ до $1,9 \text{ кг/см}^2$ (от $29,43$ до $186,39 \text{ кН/м}^2$) вызвало снижение микротвердости поверхностного слоя с 405 до 359 кг/мм^2 (с $3973,05$ до $3521,79 \text{ Мн/мм}^2$). Поэтому блестящие поверхности (обработанные с давлением до $1,9 \text{ кг/см}^2$ (до $186,39 \text{ кН/м}^2$)) имеют пониженную износостойкость по сравнению с матовыми. Такое положение типично для условий доводки плоскостей, характеризующихся резанием-царапанием обрабатываемой поверхности. В отличие от блестящих поверхностей, полученных при доводке в режиме резания-царапания, блестящие поверхности, полученные в режиме полирования, обладают повышенной износостойкостью.

Блеск в этом случае может быть достигнут за счет эффекта трения поверхности при непосредственном контакте притира и детали. Для повышения эффективности процесса плоской доводки свободным абразивом и получения высокой износостойкости обработанной поверхности процесс плоской доводки необходимо вести следующим образом: вначале абразивом большей зернистости с большим давлением, а затем абразивом меньшей зернистости при давлении $0,3\text{—}0,5 \text{ кг/см}^2$ ($29,43\text{—}49,05 \text{ кН/м}^2$).

Качество доводки плоских деталей свободным абразивом существенно изменяется с изменением вязкости смазочного состава. Поверхности,

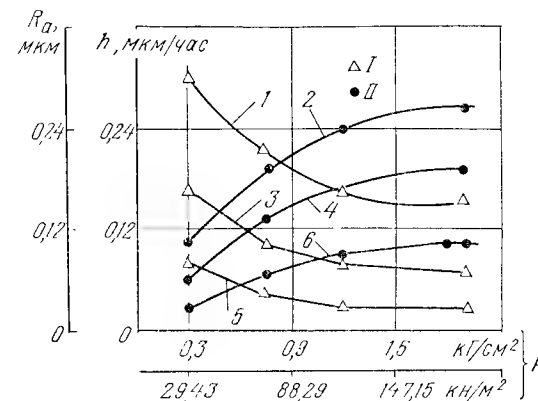


Рис. 61. Зависимость шероховатости и скорости изнашивания образцов от давления: I — R_a ; II — h ; 1, 2 — ЭБМ40; 3, 4 — ЭБМ14; 5, 6 — ЭБМ5

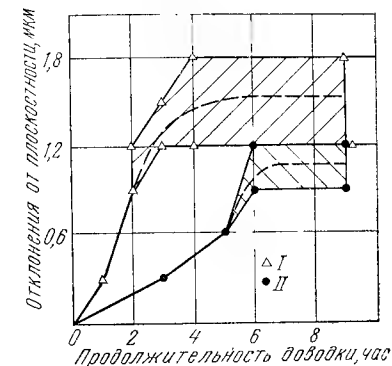


Рис. 62. Влияние продолжительности доводки деталей на станке С-15 на их точность: I — $n_1 = 180 \text{ об/мин}$ ($18,9 \text{ рад/сек}$); II — $n_1 = 60 \text{ об/мин}$ ($6,3 \text{ рад/сек}$)

доведенные с использованием вспомогательных материалов пасты, обладающих высокой вязкостью, получают в результате доводки обычно кратерообразные углубления. По глубине они приблизительно соответствуют $1/3$ части первоначального размера абразивного зерна. При малой вязкости пасты доведенная поверхность имеет типичные царапины от скольжения зерен по поверхности. Эксперименты по замеру толщины пленок жидкой среды между плоскостью притира и обрабатываемой поверхностью показали [139], что закономерной связи между вязкостью жидкости и толщиной пленки нет. Однако толщина таких пленок существенно зависит от давления притира на детали. По мере возрастания давления толщина пленки резко уменьшается. Толщина пленки не зависит от вязкости, но оказывает значительное влияние на процесс доводки плоских деталей. Поэтому качеством доводки плоских деталей можно управлять, изменяя как удельное давление, так и применяемую жидкую среду.

Точность абразивной доводки. При доводке плоских и других деталей выбор необходимого оборудования осуществляется в зависимости от его технологических возможностей и требований, предъявляемых к обрабатываемой детали. При доводке, например, мерительных плиток (конце-

Таблица 41

Физические свойства обработанной поверхности [138]

Давление притира		Микротвердость H_{20}		Искажение кристаллической решетки $\frac{\Delta a}{a} \cdot 10^{-3}$	Величина блоков $D \cdot 10^{-6} \text{ см}$	Плотность дислокаций $\rho \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$
кг/см^2	кн/м^2	кг/мм^2	Мн/м^2			
0,30	29,430	405	3973,05	2,5	0,51	7,4
0,75	73,575	379	3717,99	2,4	0,70	6,7
1,90	186,390	357	3502,17	2,3	0,97	6,0

вых мер длины) последовательно используются следующие плоскодоводочные станки: мод. 3816, ТО-ПД-01 конструкции завода «Калибр» и конструкции В. Д. Семенова. Технологические особенности процесса и получаемые при доводке мерительных плиток результаты точности по обработке приведены в табл. 42. Из таблицы следует, что получение неплоскостности плиток в 0,6 мкм, непараллельности в 0,1 мкм, шероховатости поверхности 13в — 14-го классов требует выполнения четырех последовательных операций с постепенным уменьшением количества одновременно обрабатываемых деталей со 128 до 16. На последней операции доводка должна осуществляться притирами, шаржированными одно- или двухмикронным абразивом из электрокорунда белого или глинозема.

Получаемые результаты по качеству доводки мерительных плиток сказываются прежде всего на их эксплуатационных свойствах. Важнейшее из них — притираемость плиток. Это свойство определяется прочностью сцепления плиток при надвигании одной из них на другую. Согласно ГОСТ 9038—58, притираемость оценивается значением силы сдвига, разрушающей блок из двух притертых плиток.

Влияние продолжительности доводки на точность обработки деталей $\varnothing 40 \text{ мм}$ исследовалось П. Н. Орловым [112]. Обработка осуществлялась на станке С-15 пастой АСМ5 в течение 9 час при давлении $P=0,4 \text{ кг/см}^2$ (39,24 кн/м²), число оборотов n_2 шпинделя изделия составляло 192 об/мин (2,016 рад/сек), число оборотов притира n_1 было 60 и 180 об/мин (6,3 и 18,9 рад/сек). В начальный момент обработки (исходное отклонение рабочей поверхности притира от плоскости 1—3 мкм) независимо от режима доводки погрешность формы и отклонение от плоскостности деталей не превышали 0,3 мкм. Отметим, что образцы, обработанные при скорости вращения притира $n_1=180 \text{ об/мин}$ (18,9 рад/сек), имеют одинаковое отклонение от плоскостности, как и при $n_1=60 \text{ об/мин}$ (6,3 рад/сек), однако этот результат в первом случае наступает в 3 раза быстрее, чем во втором. Дальнейшее изменение неплоскостности в зависимости от продолжительности обработки видно из рис. 62.

Анализ графиков показывает, что точность формы плоской поверхности детали, обработанной на плоскодоводочных станках, зависит от продолжительности доводки в той степени, в какой она влияет на сохранение в процессе доводки исходной геометрической формы рабочей поверхности притира.

Таблица 42
Условия и результаты доводки мерительных плиток (концевых мер длины)

Номер операции, тип оборудования, режим доводки	Припуск под доводку, мм	Кол-во одновременно обрабатываемых деталей	Результаты доводки			класс шероховатости поверхности
			разброс размеров в партии, мм	отклонение от плоскостности, мм	отклонение от параллельности, мм	
Операция I. Двухдисковый доводочный станок (3816). Паста ЭБМ28+керосин; скорость 40—60 м/мин; давление 1,2 кг/см ² (117,72 кн/м ²); время обработки 5 мин	0,03—0,05	128	0,0050	0,0020	0,0030	10а
Операция II. Станок завода «Калибр» (ТО-ПД-01). Паста ЭБМ7+керосин+стеарин; скорость 15—20 м/мин; давление 1,4 кг/см ² (137,34 кн/м ²); время обработки 2,5—3 мин	0,01—0,015	32	0,0020	0,0015	0,0010	11б
Операция III. Станок завода «Калибр» (ТО-ПД-01). Притиры шаржированы микропорошками ЭБМ3, ЭБМ2; перед доводкой партия деталей имеет разброс в 1 мкм; скорость 10 м/мин; давление 1,2 кг/см ² (117,72 кн/м ²); время обработки 1,5—2 мин	0,005—0,006	32	0,0005	0,0010	0,0003	12б
Операция IV. Станок конструкции В. Д. Семенова. Разброс партии деталей 0,2—0,3 мкм; доводка в два перехода притирами, шаржированными: а) ЭБМ2 и ЭБМ1; б) глиноземом М2 и ЭТМ1, ЭТМ2; скорость 6—7 м/мин; давление 0,8—1 кг/см ² (78,48—98,1 кн/м ²); время обработки 2—3 мин	0,0008—0,0012	16	0,0001	0,0006	0,0001	13в—14а

Для оценки влияния продолжительности доводки на износ притира можно использовать последовательно снимаемые с притира кривые линейного износа его (в определенном сечении). Измерение линейного износа притира в диаметральном поперечном сечении в зависимости от продолжительности доводки показывает, что, несмотря на изменение формы, условия воздействия абразива на каждую элементарную площадку поверхности притира в процессе доводки партии деталей, очевидно, сохраняются. Поэтому можно считать, что износ притира в каждой рабочей точке поверхности во времени ориентировочно может быть описан линейным законом.

Условия воздействия абразивных (алмазных) зерен в месте контакта деталь—притир имеют весьма сложный характер. Они определяются технологическими, кинематическими, динамическими факторами, особенностью конструктивной формы рабочей поверхности притира (форма канавок для подвода абразива) и детали. Доводка плоских деталей на двухдисковых плоскодоводочных станках с планетарной наладкой имеет свои особенности. П. Н. Орлов процесс изнашивания притиров двухдисковых плоскодоводочных станков условно подразделяет на три стадии: первая — период кинематического износа; вторая — период приработки рабочих поверхностей притиров друг к другу; третья — период неравномерного изнашивания приработанных рабочих поверхностей.

Износ притиров на первой стадии зависит прежде всего от распределения механической работы по рабочим поверхностям. Закономерность распределения обуславливается соотношением скоростей рабочих органов станка, схемой расположения деталей в кассете или в сепараторе. На стадии кинематического износа возможны следующие схемы изнашивания поверхностей притиров:

- 1) с раскрытием стыка на периферии;
- 2) с раскрытием стыка в центральной части;
- 3) параллельное: а) нижнего на периферии, а верхнего в центральной части; б) верхнего на периферии, а нижнего в центральной части.

Продолжительность этапа кинематического изнашивания зависит от кинематических, динамических и технологических параметров процесса.

По мере изнашивания притиров зазор между рабочими поверхностями и деталями увеличивается и в некоторый момент становится большим, чем размер одного-двух абразивных зерен. С этого момента верхний притир самоустанавливается по деталям и нижнему притиру. Начинается этап приработки верхнего притира к нижнему. На стадии приработки первая и вторая схемы изнашивания притиров, полученные на стадии кинематического износа, постепенно переводятся к третьей схеме (схеме параллельного изнашивания), при этом верхний притир прирабатывается к нижнему. В момент окончания приработки минимальный зазор между рабочими поверхностями притиров складывается из толщины детали и двух размеров абразивного зерна. В этот период разброс по толщине деталей в партии снижается до минимума. Именно поэтому при доводке нескольких партий деталей наивысшая точность по плоскостности и разбросу размеров по толщине достигается не в первых партиях на новых, только что выправленных притирах, а через несколько партий.

Начало третьего этапа износа обуславливается степенью различия законов распределения механической работы по верхнему и нижнему притирам. Этот этап характеризуется образованием неравномерного зазора между притирами, изменением толщины абразивного слоя, реальных размеров площадок контакта детали с притирами, рабочего давления в местах контакта. Наблюдается резкое падение точности обработки, увеличиваются отклонения от плоскостности и разброс по толщине деталей в партии.

Таким образом, в качестве основных факторов, обеспечивающих высокое качество и точность обработки деталей на плоскодоводочных станках, можно назвать:

- 1) «равномерное» распределение механической работы по рабочей поверхности притира, затрачиваемой на его изнашивание;
- 2) плавное изменение скорости и ускорения относительного движения различных точек детали по рабочей поверхности притира;
- 3) равномерный съем материала с обрабатываемой поверхности детали при ее формообразовании;
- 4) постоянство физико-механических свойств абразивного слоя пасты или суспензии в процессе доводки;
- 5) разгрузку кассет (сепараторов) от силового воздействия деталей при двусторонней обработке.

Для теоретического определения предполагаемой формы рабочей поверхности притира в МВТУ им. Н. Э. Баумана разработаны два метода расчета. В основу методов положено определение закона распределения механической работы по поверхности притира при относительном движении точки притира по поверхности детали (I метод) и детали по притиру (II метод) за цикл обработки.

Влияние траектории перемещения деталей. Существенный недостаток процесса плоской доводки — неодинаковый износ доводочного диска по сечению. Изнашивание дисков-притиров определяется траекторией перемещения деталей или их точек по поверхности притиров, вид траектории — направлением вращения притира и сепаратора (или кассеты) с деталями.

Характер истирания притира зависит от рассеивания следов движения деталей по притиру. При доводке деталей на двухдисковом планетарном станке характер изнашивания притиров зависит прежде всего от величины и соотношения скоростей вращения притира и внутреннего зубчатого венца (табл. 43). При неподвижном притире следы деталей на притире имеют вид, представленный на рис. 63 (см. первую строку табл. 43). При этом наблюдается усиленный износ рабочей поверхности у внутреннего края диска-притира. Равномерные формы износа рабочей поверхности притира достигаются при вращении внутреннего венца и доводочного диска в противоположных направлениях. На рис. 64 представлены следы царапин на поверхности притира для условий, приведенных в 5-й строке табл. 43.

Для получения высокого качества доводки важно, чтобы обрабатываемая деталь в кассете располагалась не в центре, а с краю. В этом случае при движении она будет пересекать всю картину траекторий. Де-

тали, расположенные в центре, как правило, имеют завал кромок. Однако только по виду траекторий относительного движения детали по притиру, густоте и равномерности заполнения сетки траекторий рабочей поверхности притира нельзя дать количественную оценку равномерности его изнашивания. Стабилизация качества доводки плоских деталей, а также сохранение исходной геометрической формы рабочей поверхности притира зависят от величины и закона изменения скорости перемещения деталей по притиру. При постоянной скорости перемещения деталей по

Таблица 43
Данные локального износа рабочей поверхности притира [140]

Число оборотов притира	Число оборотов внутреннего венца	Характер истирания рабочей поверхности притира
об./мин		
0	—37	Истирание около внутренней поверхности
—31	—57	Истирание около наружной поверхности
—31	—37	То же
—31	—31	»
—31	—18	Незначительное истирание около наружной поверхности
+31	—57	Равномерно (целесообразно для деталей средних размеров)
+31	—37	То же
+31	—18	Равномерно (целесообразно для изделий малого размера)

притиру глубина деформированного слоя больше, чем при переменной. При доводке со значительным ускоренным движением наступает «охрупчивание» изнашиваемого материала. Рост динамичности движения деталей по притиру способствует разрушению материала детали и притира с меньшей долей пластической деформации поверхностного слоя.

Влияние формы и расположения канавок. Для достижения равномерного изнашивания притиров на всей поверхности притира или в тех зонах, где он меньше всего изнашивается, прорезают канавки. Канавки служат для размещения лишней пасты, ускорения процесса отвода стружки и охлаждения детали и притира. При отсутствии канавок паста собирается у края детали. Это увеличивает износ притира и снижает качество доводки. Однако притиры с канавками имеют ряд недостатков: а) увеличивается расход пасты, так как часть ее уходит на заполнение канавок; б) увеличивается стоимость притиров; в) усложняется эксплуатация притиров, так как в канавки могут попадать инородные тела, что приводит к повреждению и появлению изъянов на поверхности обрабатываемого изделия; г) при малых размерах изделие может застревать в канавках; д) канавки с закругленными краями быстро меняют свой профиль, поддерживать который очень трудно.

Форма сечения канавок, их вид в совокупности с направлением вращения притира определяют направление перемещения абразивной пасты (суспензии) по притиру.

Исследование влияния направления перемещения абразивной пасты по притиру на эффективность процесса выявило два противоположных мнения. Согласно первому из них, направление перемещения зерен абразива от периферии к центру считается положительным [141]. Лихтенбергер [140], наоборот, считает, что применение притиров с канавками, по-

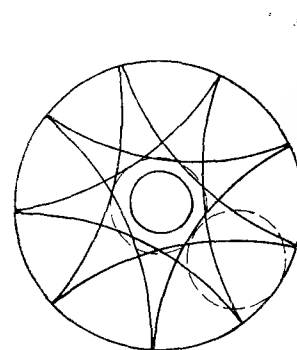


Рис. 63. Истирание притира (следы царапин) около внутренней окружности

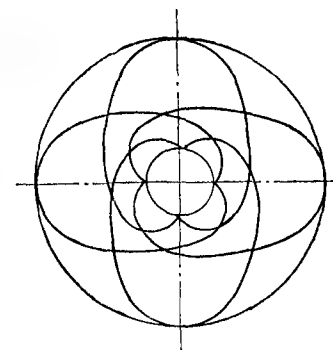


Рис. 64. Равномерное рассеивание следов по рабочей поверхности притира

дающими абразивную смесь от периферии к центру притира, ведет к снижению производительности и качества доводки.

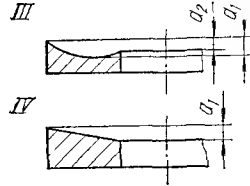
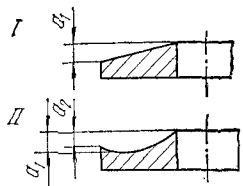
Работоспособность дисков-притиров с различными канавками (в виде квадратной сетки, концентрично и эксцентрично расположенных окружностей, спирали Архимеда и без канавок) исследовалась в МВТУ им. Н. Э. Баумана [112]. Исследования проводились на плоскодоводочном станке мод. LP-12В. Чугунные притиры (материал СЧ 15-32, НВ 114—140) имели наружный диаметр 308, внутренний 70 мм. Число оборотов притира $n_1 = 60$ об./мин (6,3 рад/сек); число оборотов правильного кольца в зависимости от расстояния центра кольца от притира составляло $n_2 = 50—58$ об./мин (5,25—6,09 рад/сек). Обработывались квадратные и прямоугольные пластинки размером 16×16 и 12×18 мм. Для обработки применялась абразивная суспензия на основе электрокорунда белого марки ЭБ99 и воды при отношении жидкой и твердой фазы Ж : Т = 1 : 1. Суспензия подавалась автоматически по 80—100 капель в 1 мин. Рабочее давление в зоне контакта деталь — притир и правильное кольцо — притир $P = 0,16—0,2$ кг/см² (15,696—19,62 кн/см²). Центр правильного кольца устанавливали в двух положениях: на расстоянии от оси притира, равном 99 и 30 мм.

Данные по применению формы изношенной рабочей поверхности притиров с различной геометрией для первой схемы установки приведены в табл. 44.

Таблица 44

Износ притиров и съем материала с плоских деталей при доводке на станке LP-12B

Исходная форма рабочей поверхности притира	Зернистость абразива	Форма рабочей поверхности притира после t час работы	Отклонения от плоскостности притира a_1 и a_2 , мкм	Съем материала с детали, мм ³ /мин
Гладкая без канавок	M10	$I.t=3,3$	$a_1=13,5$	13,3
Квадратная сетка (вафлеобразная), $S=22$ мм	M10	$I.t=10,2$	$a_1=26$	17,0
Концентрично расположенные окружности, $S=22$ мм	M10	$IV.t=6$	$a_1=9$	—
Концентрично расположенные окружности, $S=10$ мм	M14	$II.t=10$	$a_1=6,5$ $a_2=1$	—
Эксцентрично расположенные окружности, $e=9$ мм, $S=22$ мм	M7	$IV.t=8$	$a_1=\frac{10^*}{11}$	15,7*
Спираль Архимеда, $S=22$ мм	M7	IV или $III.t=8$	$a_1=8$; $a_2=5$	17,1
	M14	$II.t=8$	$a_1=4$; $a_2=3$	19,5*
Спираль Архимеда левая	M14	$II.t=10$	$a_1=14$; $a_2=13$	—
	M10	$I.t=8,5$	$a_1=20$	—



Примечание. В числителе—данные для канавок, заполненных цементующей смесью, в знаменателе—при работе притирами с незаполненными канавками. Исходная неплоскостность 1—3 мкм.

Для притиров гладких без канавок, с вафельными канавками (шаг $S=22$ мм), с канавками по спирали Архимеда ($S=6$ мм) интенсивность износа на периферии больше, чем в точках, расположенных около оси притира. Концентрично расположенным канавкам ($S=10$ мм), канавкам по спирали Архимеда (левая, $S=22$ мм, $S=10$ мм) соответствует криволинейная форма сечения изношенного притира, причем интенсивность износа больше на периферии диска, чем в центре. При канавках в виде правой спирали Архимеда также возможна криволинейная форма износа, однако при этом больше изнашиваются внутренние поверхности по сравнению с периферией (форма III, табл. 44). Эксцентрично и концентрично расположенные кольцевые канавки ($S=22$ мм) способствуют ускоренному изнашиванию внутренней части притира (форма IV, табл. 44).

Таким образом, изменяя форму канавки, можно управлять процессом износа рабочей поверхности притира, сохраняя его плоскостность в определенных пределах. Различные по форме канавки по-разному создают направление движения и распределения абразива на поверхности притира. Перераспределение абразивной суспензии по поверхности притира и создание направленного перемещения абразива способствуют регулированию износа притира.

Изменение направления и скорости движения абразивной суспензии по канавкам зависит от величины угла атаки β — угла между вектором скорости относительного движения точки обрабатываемой поверхности по притиру (линия, касательная к траектории движения) и касательной к средней линии канавки в точке их пересечения. Оптимальным в пределах всей канавки считается острый угол атаки ($\beta=10\text{—}70^\circ$). В этом случае создаются условия направленного движения абразива. При угле $\beta=90^\circ$ движения абразивных зерен вдоль канавки не происходит, зерна абразива интенсивно воздействуют на боковые грани канавки, вызывая развал профиля поперечного сечения ее.

Установлено, что оптимальные углы атаки β , равные $10\text{—}70^\circ$ за время одного цикла, создаются для канавок, имеющих следующие параметры: канавки в виде архимедовой спирали левой или правой и окружности шагом $S=(0,05\text{—}5)D$, где D — диаметр наружного размера рабочей поверхности притира, равный $50\text{—}1000$ мм. Для приведенных выше условий обработки на станке LP-12B $n_1=60$ об/мин ($6,3$ рад/сек), $n_2=50$ об/мин ($5,25$ рад/сек) для притиров с канавками в виде архимедовой спирали $S=22$ мм угол атаки колеблется от 7 до 40° (от $0,1225$ до $0,7$ рад), для эксцентрично расположенных относительно оси притира с $e=9$ мм и $S=22$ мм — от 5 до 44° (от $0,0875$ до $0,77$ рад).

Лихтенбергер характеризует геометрию канавки углом резания δ . Это угол, заключенный между радиусом диска и канавкой. Для всех дисков с канавками различной формы требуется постоянный по всей рабочей плоскости диска угол резания. В зонах притира, где необходимо обеспечить повышенный износ, канавки должны располагаться перпендикулярно к траектории доводки с целью уменьшения износа притиров. Ряд зарубежных компаний разработали гамму плоскодоводочных станков с дисками-притирами из закаленной легированной стали. Метод доводки деталей на таких станках получил название силовой доводки. Его рекомендуется применять для совмещения шлифования и доводки. Преимущества этого метода в том, что резко возрастает стойкость плит-притиров, обеспечивается легкая смена абразива, возможно использование на одном и том же диске абразива различной зернистости. При этом с детали может быть снят слой от $0,13\text{—}0,25$ до $0,5\text{—}1,5$ мм. При доводке используются повышенные скорости вращения и малое удельное давление — от $0,21$ до $0,28$ кг/см² (от $20,601$ до $27,468$ кН/м²). В станке фирмы «Флексибокс» применяются приспособление для контроля неплоскостности притиров в процессе доводки и специальные устройства для подачи и равномерного распределения по рабочей поверхности доводочной пасты. Достижимая точность доводки деталей на этом станке от 1 до 2 световых волн (от $0,3$ до $0,6$ мкм).

3. Правка и шаржирование плоских притиров

Для достижения на вновь изготовленном плоском притире требуемой геометрической формы рабочей поверхности или восстановления ее на изношенном притире производят их правку. Правка может осуществляться

либо непосредственно в процессе доводки деталей, либо в стационарных условиях.

Правка притиров в процессе доводки деталей. 1. Правка с помощью правильного кольца. Для этого на однодисковых плоскодоводочных станках устанавливается одно или несколько правильных колец. Кольца подбираются по размерам и весу и устанавливаются на строго определенном расстоянии от центра диска-притира. В случае правки выпуклой плиты кольца смещают внутрь (в случае незначительной правки смещают одно или два кольца), при правке вогнутой плиты кольца смещают наружу, при правке плиты с волнистой поверхностью одно кольцо смещают внутрь, а второе наружу. Однако величина разового смещения не должна превышать 5 мм. При сильном повреждении плиту необходимо предварительно шлифовать и править в стационарных условиях.

В работе [142] предложен новый метод правки притиров с помощью правильных колец. Кольца выполняются в виде зубчатых колес и находятся в зацеплении со съемным зубчатым колесом, расположенным в центре притира.

Когда центральное зубчатое колесо снято, направление вращения правильных колец и притира в периферийных точках совпадает, а в точках, наиболее близких к центру, противоположно. Это способствует получению на притире вогнутой формы рабочей поверхности. Для ее исправления устанавливается центральное зубчатое колесо. Правильные кольца получают при этом принудительное вращение в противоположном направлении, что способствует получению на притире выпуклой формы, а соответственно и исправлению полученной ранее вогнутости. Подобный метод использован в станке фирмы «Спид Там».

На двухдисковых плоскодоводочных станках планетарного типа в качестве правильных колец используются специальные сателиты — зубчатые колеса с большим внутренним отверстием. Сателиты подбирают по весу. Правка возможна при незначительных погрешностях притира, при значительном биении притира возникает биение сателитов и правка становится невозможной. В двухдисковом станке фирмы «Курсипаккинг» правка происходит с помощью ограничительного кольца. Такая правка эффективна при больших величинах съема. При этом должны быть подобраны соответствующие его перемещения, соотношение величины нагрузки, действующей на обрабатываемую деталь, и веса ограничительного кольца.

Для правки притиров двухдисковых плоскодоводочных станков фирма «Цугами» (Япония) предлагает также использовать правильные кольца, которые имеют достаточную возможность для перемещения. Предусматривается одновременная правка кольцами верхней и нижней плит (патент Японии № 433176).

2. Правка с помощью обрабатываемых деталей. Для осуществления такой правки необходима специальная кинематическая наладка доводочного станка. Для двухдискового плоскодоводочного станка она заключается в подборе схемы установки деталей в сепаратор, определении скорости, направления и продолжительности вращения рабочих органов станка, а также последовательности смены циклов обработки. Опыты,

проведенные Ю. И. Нестеровым и Ю. В. Рыбаковым с использованием суспензий из веретенного масла № 2 и карбида кремния ($J: T=5:2$) при рабочем давлении, равном $0,5 \text{ кг/см}^2$ ($49,05 \text{ кн/м}^2$), показали, что применение этого метода на станке 3Б816 позволяет при обработке магнитов из сплава ЮНДК-24 обеспечить неплоскостность в пределах 15—25 мкм в течение 7—8 рабочих смен, а разброс обрабатываемых деталей — в пределах 2—3 мкм.

Стационарная правка. В стационарных условиях правка притиров обычно осуществляется по методу трех плит. Перед правкой в комплект

Таблица 45

Последовательность правки притиров на станке 3804К

Этап	Место установки притиров (I, II, III)		Абразивный материал
	на планшайбе	в сепараторе	
1	I I II	II III III	КЗМ20, АСМ20, ЭБМ20
2	II II I	I III III	КЗМ7, АСМ7, ЭБМ7
3	III III I	I II II	КЗМ3, АСМ3, ЭБМ3
4	I I II	II III III	Без абразива. Смесь дизельного топлива с 70%-ной олеиновой кислотой

подбирают три притира, которые потом будут последовательно взаимно притираться. Взаимная правка (притирка) может выполняться на специальных станках (например, 3804К) или с использованием основного плоскодоводочного станка и специальных приспособлений.

На специальном станке 3804К правят притиры, имеющие наружный диаметр 400—450 мм. Перед правкой один из притиров закрепляется на горизонтальной неподвижной планшайбе, второй устанавливается в сепараторе. Рабочая поверхность верхнего и нижнего притиров при этом соприкасается. Сепаратор имеет два движения: вращательное и осциллирующее. Он устанавливается на поводковые пальцы, закрепленные на верхнем торце поводковой шестеренки (с внутренним зацеплением). Движение этой шестерни передается от электродвигателя через червячный редуктор, центральную шестерню и эксцентричные блоки шестерни.

Перед установкой притиров на станок контролируют их неплоскостность. Если она превышает 0,05 мм, то притиры перед правкой шлифуют. Условия и последовательность правки притиров на станке 3804К приведены в табл. 45. После правки притиры II и III ставят на свои места на плоскодоводочном станке, а притир I остается в качестве контрольного для правки других.

Правка притиров без снятия их с плоскодоводочного станка с высокой точностью возможна с помощью специального приспособления, разработанного А. И. Глазуновым [143]. Правка в этом случае, так же как и на специальном станке, заключается в последовательной взаимной притирке трех дисков: нижнего и верхнего притиров и контрольного диска. Сначала притирают рабочую поверхность нижнего притира с одной из сторон контрольного диска. Для этого на нижний притир устанавливают приспособление и контрольный диск. В процессе правки нижний притир вращается, а лежащий на нем контрольный диск перемещается вручную. Затем контрольный диск переворачивают и притирают верхний притир с притертой ранее поверхностью контрольного диска. После этого приспособление вместе с контрольным диском снимают со станка и притирают нижний притир с верхним. Правка притиров по этому способу включает обычно два-три цикла.

Контроль качества правки проверяют по краске. Для этого на проверяемый притир накладывают контрольную (поверочную) плиту, на поверхность которой нанесен тонкий слой краски. Устанавливают плиту по центру притира, перемещая ее 2—3 раза в принятом радиальном направлении на 15—20 мм. Затем ее возвращают в исходное положение и передвигают несколько раз в направлении, перпендикулярном первому. После этого контрольную плиту осторожно снимают с проверяемого притира и по отпечатку на нем судят о качестве правки. Отпечаток при проверке должен быть на всей рабочей плоскости притира с отдельными небольшими разрывами, расположенными равномерно.

Согласно способу, разработанному в ЦНИТА, правка притиров бывает предварительная и окончательная: окончательная предусматривает одновременно и шаржирование абразивных зерен в поверхность притира; предварительная производится на плоскодоводочном станке. Комплекс из трех притиров правится в следующей последовательности: сначала притираются первый и второй, затем второй с третьим и, наконец, третий с первым. При этом большое внимание уделяется расположению притиров. На всех стадиях притирки вверху должны быть соответственно первый, второй и третий притиры.

Предварительная правка в зависимости от состояния рабочей поверхности притиров осуществляется с последовательным использованием абразивного порошка из электрокорунда белого зернистостью от М40 (М20) до М10 и веретенного масла. В процессе правки на плоскодоводочном станке нижний притир не вращается. Верхнему притиру вручную придают движения типа «восьмерки», одновременно периодически меняют положение нижнего притира.

Окончательную правку (взаимное шаржирование) притиров производят на специально оборудованном стенде, представляющем собой стол жесткой конструкции с тремя посадочными гнездами для установки притиров. Посадочные места по конструкции аналогичны базовым площадкам для установки нижних притиров на станке. Строго горизонтальное положение посадочных мест достигается выверкой с помощью уровня. Окончательную правку производят с использованием абразивного порошка той зернистости, которая будет применяться при доводке деталей.

При этом верхний и нижний притиры имеют те же движения, что и при предварительной правке притиров на плоскодоводочном станке.

Для контроля качества правки и шаржирования диски тщательно протираются марлей, смоченной бензином, и просушиваются. Затем верхний диск устанавливается на нижний и смещается по нему несколько раз в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В результате от шаржированных зерен на рабочих поверхностях притиров появляется сетка царапин. Качество правки и шаржирования контролируется по наличию равномерной сетки, отсутствию отдельных пятен на всей плоскости дисков-притиров, шагу сетки и форме царапин. Внедрение зерен в притиры (шаржирование) может осуществляться также катанием твердосплавного ролика или скольжением твердосплавной (или стальной закаленной) пластинки по притиру.

Методы оценки качества шаржирования разработаны недостаточно. В исследовательских работах качество шаржирования определяется по сетке штрихов на эталонном образце, визуальным методом с помощью металлографического микроскопа и другими способами.

4. Качество доводки цилиндрических деталей на двухдисковых плоскодоводочных станках

В сравнении с обработкой плоских при доводке цилиндрических деталей на двухдисковых плоскодоводочных станках контакт деталей с притирами и их перемещение имеют ряд особенностей:

1) контактирование деталей с притирами осуществляется по линии, что способствует созданию в месте контакта значительных давлений;

2) деталь в процессе доводки вращается, скорость вращения ее зависит от распределения сил трения (резания) в зоне контакта детали, притиров и сепаратора;

3) формообразование обрабатываемой цилиндрической поверхности осуществляется двумя притирами одновременно;

4) большие контактные давления и скопление доводочной пасты в местах контакта затрудняют работу абразивных зерен.

Названные особенности процесса доводки цилиндрических деталей обуславливают соответствующий характер изнашивания дисков-притиров. Форма рабочей поверхности притиров непрерывно изменяется. Наиболее часто встречаются два основных вида погрешностей формы рабочей поверхности притиров: один из них характеризуется «раскрытием стыка» рабочих поверхностей дисков-притиров по периферии (рис. 65, б), а второй — по внутренней части (рис. 65, в).

Названные погрешности формы рабочей поверхности притиров, а также наклонное расположение деталей в сепараторе приводят к тому, что контакт рабочей поверхности притиров с деталями может осуществляться в точках, смещенных от осевой плоскости обрабатываемой заготовки на расстояние l и m (точки a_b , a_n , b_b , b_n).

В процессе доводки наиболее ускоренно изнашивается внутренняя, расположенная ближе к центру зона нижнего притира. Это происходит в связи с неравномерным распределением давления по длине детали.

Нагрузка на цилиндрическую деталь зависит от ее расположения на нижнем притире и формы рабочей поверхности притиров. Для равномерного изнашивания рабочей поверхности притиров обычно подбирают соответствующую схему (кинематику) перемещения детали по притиру. Весьма эффективным оказалось использование встречного направления вращения нижнего притира и сепаратора.

В серии экспериментов [144], посвященной выявлению условий получения высокой точности обработки цилиндрических деталей на плоско-доводочных станках, доводились детали $\varnothing 12$ мм и длиной 35 мм из

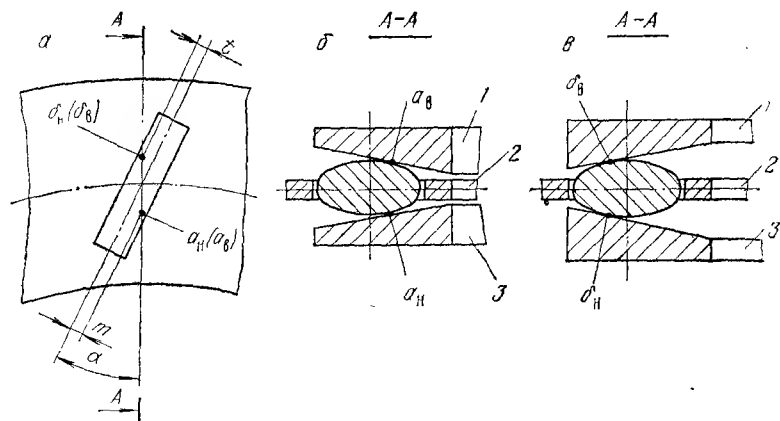


Рис. 65. Схема расположения точек контакта изношенной поверхности притиров и детали (по В. А. Полухину): а — положение детали на нижнем притире; б — «раскрытие стыка» притиров по периферии; в — «раскрытие стыка» притиров по внутренней части; 1 — верхний притир; 2 — сепаратор; 3 — нижний притир

стали 12ХН3А (HRC 62). Притиры, на которых обрабатывались детали, имели диаметр 450 мм, ширину рабочего кольца 40 мм (при неплоскостности 2—4 мкм) и 110 мм (при неплоскостности 11 мкм). Исходная нецилиндричность и разноразмерность деталей была не более 5 мкм. При соотношении чисел оборотов нижнего притира и сепаратора $i=0,375$, давлении $P=0,7$ кг/см (68,67 н/см) и эксцентриситете e вала эксцентрика, равном 10 мм, неплоскостность притиров шириной 40 мм не превышала 2 мкм в течение 5 час работы, а нецилиндричность деталей в этом случае была не более 1,3 мкм. С увеличением i до —3,5 неплоскостность притиров возрастала. Однако при этом погрешность геометрической формы детали в осевом направлении уменьшилась в 1,5—2 раза. Погрешность формы детали в осевом направлении уменьшается с увеличением угла наклона гнезд деталей α в сепараторе. Изменение этого угла от 6 до 18° (от 0,105 до 0,315 рад) снижает погрешность формы в осевом направлении в 1,1—1,5 раза. Одновременное увеличение i в 2—2,5 раза и уменьшение величины эксцентриситета e вала вращения сепаратора с 15 до 5 мм снижают погрешность формы в диаметральной сечении в 1,5—2,2 раза.

При доводке цилиндрических деталей на плоскодоводочных станках шероховатость обработанной поверхности получается различной по ее длине. Это связано с различным характером перемещения участков детали в процессе обработки относительно притиров. Съем металла в середине детали осуществляется в условиях качения ее, а по концам — в условиях скольжения.

Данные по изменению шероховатости поверхности по длине детали представлены на рис. 66 [144]. Опыты проводились при $i=1,2$, $e=18$ мм, $\alpha=18^\circ$ (0,315 рад), навеска пасты составляла 2 мг ($2 \cdot 10^{-6}$ кг), расход ке-

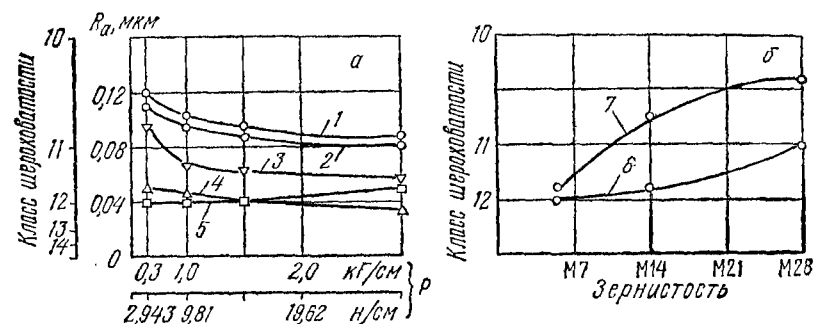


Рис. 66. Зависимость шероховатости деталей от давления (а) и зернистости белого электрокорунда (б): 1 — M28 (I); 2 — M28 (II); 3 — M14 (I); 4 — M5 (I); 5 — M5 (II); 6 — $P=1,5$ кг/см (14,715 н/см); 7 — $P=0,3$ кг/см (2,943 н/см)

росина — 40 капель/мин. Шероховатость измерялась в двух сечениях: у торца детали — сечение I и в ее середине — сечение II. Полученные в экспериментах данные позволили найти оптимальные условия доводки цилиндрических деталей на плоскодоводочных станках:

а) оптимальные режимы черновой доводки: $i=(-0,3) - (-0,4)$, скорость доводки 50—60 м/мин, эксцентриситет $e=15-18$ мм, угол $\alpha=15-18^\circ$ (0,2625—0,315 рад);

б) оптимальные режимы чистовой доводки: $i=(-3,5) - (-1,2)$, скорость 20—30 м/мин (при этом один из притиров (верхний или нижний) остается неподвижным), $e=5-10$ мм, $\alpha=15-18^\circ$ (0,2625—0,315 рад).

При доводке высокоточных цилиндрических деталей существенное значение имеет зернистость абразива. В большинстве случаев она не должна превышать 10—14 мкм. Удельное давление при доводке пастами на основе электрокорунда принимается равным 2—3 кг/см (19,62—29,43 н/см). Ширина рабочего кольца притира должна выбираться в зависимости от длины детали, обычно она принимается равной (0,8—1,2) от длины детали. При доводке деталей с «выбегом» за кромки притира максимальная величина выбега не должна превышать $2/5$ длины детали. Положительные результаты дает наклонное расположение гнезд деталей в сепараторе, при этом предпочтительнее наклон по направлению вращения нижнего притира.

Доводка высокоточных цилиндрических деталей осуществляется по методу трех ведущих деталей. Для этого из обрабатываемой партии от-

бирают по три детали одинакового размера. Размеры их должны быть на 0,001 мм больше размера остальных деталей партии. «Ведущие» три детали укладывают в гнезда сепаратора под углом 120°, в остальные гнезда — оставшиеся.

По такой технологии доводятся, например, детали топливной аппаратуры (плунжеры, иглы распылителя). После доводки и окончательного контроля годные детали перед сборкой сортируют на группы (30 групп

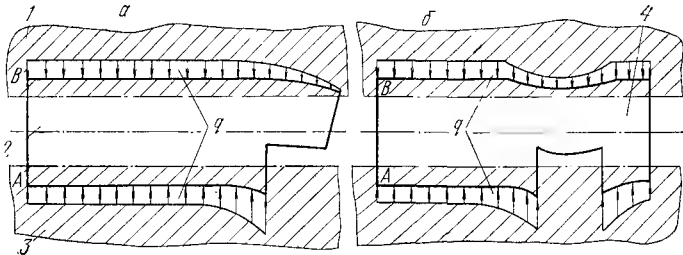


Рис. 67. Схема «погружения» роликов со сквозным (а) и глухим (б) пазами в доводочные диски: 1 — верхний притир; 2 — ролик со сквозным пазом; 3 — нижний притир; 4 — ролик с глухим пазом

через каждые 0,0005 мкм). Припуски, снимаемые при предварительной и окончательной доводке указанных деталей, и достигаемая при этом точность приведены в табл. 46.

Из таблицы видно, что к точности обработки прецизионных цилиндрических деталей топливной аппаратуры на плоскодоводочных станках предъявляются высокие требования. Наиболее трудоемким является обеспечение заданных требований по конусообразности деталей. Образование конусности находится в прямой связи с кинематикой и динамикой процесса доводки цилиндрических деталей на плоскодоводочных станках. При доводке цилиндрических деталей наблюдается неравномерное, но закономерное распределение свободного абразива по поверхности притира, причем плотность абразивного слоя увеличивается к периферии притира. В результате различные точки детали имеют неодинаковый, но строго закономерный абразивный износ, больший к концу детали, обращенному к периферии притира. Это и обуславливает получение конической формы детали. Интенсивность этого процесса связана с угловой скоростью вращения нижнего притира. С повышением угловой скорости нижнего притира конусообразность деталей увеличивается.

Влияние геометрической формы обрабатываемой поверхности цилиндрических деталей на достигаемую при доводке некруглость исследовали Н. Я. Гольдфарб и М. Л. Локшин [145]. Особое внимание было уделено обработке валов малого диаметра (до 10 мм), имеющих сквозные или глухие пазы или лыски. Схема доводки таких деталей на двухдисковом плоскодоводочном станке и эпюры действующих давлений q представлены на рис. 67. Показано расположение деталей в момент, когда произошло начальное «погружение» их в притиры перед включением вращения

Таблица 46
Точность обработки плунжеров и игл распылителя после механической доводки на плоскодоводочных станках

Тип сборки	Тип доводки	Съем металла при доводке, мм	Погрешность геометрической формы, мм (не более)					Класс шероховатости поверхности
			непрямолинейность оси	овальность	конусообразность	короткость (бокообразность)	огранка	
Взаимная	Предварительная	0,009—0,015	0,003	0,005	0,005	0,002	До 10-го	
	Окончательная	0,002—0,005	0,002	0,002	0,003	0,001	До 12-го	
Селективная сборка	Предварительная	0,006—0,01	0,0005—0,0008	0,0002—0,0009	0,0008—0,0003	Не допускается	11—12-й	
	Окончательная	0,002—0,005	0,0002—0,0007	0,0001—0,0007	0,0003—0,0002	То же	12—13-й	

Таблица 47
Трудоемкость (Т, мин, на 100 деталей) доводки отверстий в деталях топливной аппаратуры

Трудоемкость по видам обработки		Втулка плунжера					Корпус распылителя бесштифтовый			Седло клапана					«Мотор-паль»
		Трудоемкость (Т, мин, на 100 деталей)					Трудоемкость (Т, мин, на 100 деталей)			Трудоемкость (Т, мин, на 100 деталей)					
		НЗТА	КТЗ	ХТЗ	АМЗ	ВМЗ-2	АМЗ	КТЗ	ВМЗ-2	НЗТА	КТЗ	ХТЗ	АМЗ		
Т ₁ (доводка отверстий)		315	305	487	655	451	954	968	236	84,7	309,5	136	151	127,0	96
Т ₂ (полная механическая обработка)		726	641	1338	1249,5	1174	2542	3232	2346	233,7	683,7	399,6	694,8	388,4	427
Т ₁ · 100% Т ₂		43	48	36	52	38	38	30	10	36	46	34	22	33	22

Примечание. НЗТА — Ногинский завод топливной аппаратуры (г. Ногинск); КТЗ — Курский завод тракторных запасных частей (г. Курск); ХТЗ — Харьковский тракторный завод (г. Харьков); АМЗ — Алтайский моторный завод (г. Барнаул); ЯЗТА — Ярославский завод топливной аппаратуры (г. Ярославль); ВМЗ-2 — Второй Варшавский моторостроительный завод (Польша); «Моторпал» — моторостроительный завод Чехословакии.

притиров и сепараторов. Наличие паза на детали приводит к неравномерному съему металла вдоль образующей цилиндра. Для образующей *A* (рис. 67, *a*) характерно то, что в местах, близких к пазу, радикальный съем металла будет больше, чем на остальных участках, для образующей *B*, наоборот, на участках, противолежащих пазу, съем будет меньшим, чем на остальных. Неодинаковость съема является причиной образования некруглости обрабатываемых деталей. На образующей *A* на участках, прилегающих к пазу, некруглость появится в форме впадин, на образующей *B* она примет форму одностороннего нароста. Для получения минимальной некруглости съем металла при доводке деталей с односторонней лыской (пазом) должен быть минимальным. Это влечет за собой необходимость снижения допустимого разброса размеров деталей, закладываемых в один сепаратор.

На некруглость цилиндрических деталей оказывает влияние технологическая наследственность. Хороших результатов можно добиться при исходной некруглости 2—3 мкм, при этом некруглость после доводки находится на уровне 0,7—0,8 мкм.

5. Качество доводки малых отверстий

Технологически операция доводки отверстий с помощью абразивной пасты обычно разделяется на черновую, предварительную, окончательную.

Анализируя современное состояние процесса доводки малых отверстий, необходимо отметить прежде всего большую нестабильность качества поверхности и точности доведенного отверстия, а также то, что процессом во время доводки управлять почти невозможно.

Дальнейшее повышение точности обработки и класса шероховатости поверхности в создавшихся условиях связано с необходимостью развития и совершенствования этого процесса. Заметим, что обычное увеличение числа ступеней доводки и уменьшение размеров абразивных зерен пока не дают желаемых результатов. Так, например, в ряде источников для получения 12—13-го классов шероховатости при плоской доводке рекомендуется выполнение 4—5 ступеней с использованием на последней алмазных зерен размером 3—5 мкм или электрокорундовых микронных и субмикронных порошков размером от 3 до 0,3 мкм. Однако к процессу доводки малых отверстий эти рекомендации не применимы. Опыт ряда заводов показывает, что применение при доводке малых отверстий тонких абразивных материалов сопровождается частым заклиниванием притира, что ведет к значительному браку, исправление которого связано с большими материальными затратами. Поэтому развитие и совершенствование этого процесса должно проходить в неразрывной связи с учетом его особенностей. Главные из них заключаются в следующем:

1) при доводке малых отверстий (в отличие, например, от доводки деталей на плоскодоводочных станках) абразивные зерна находятся в замкнутой зоне, в кольцевом зазоре между притиром и деталью;

2) съем металла осуществляется одновременно со всей обрабатываемой поверхностью, при этом часть абразивных зерен находится в контакте с деталью в течение всего процесса доводки;

3) удельное давление в зоне доводки является переменным, что влечет за собой изменение зазора между притиром и деталью;

4) существующий метод нанесения доводочной пасты (метод намазывания пасты на притир в процессе доводки) не обеспечивает ее равномерного распределения в зоне доводки.

В процессе доводки малых отверстий отсутствует оптимальный зазор между притиром и деталью. Это затрудняет удаление из зоны доводки доводочной стружки, а также равномерное распределение зерен по поверхности притира. В итоге в процессе доводки возникают условия, способствующие образованию на обрабатываемой поверхности (скопляющейся стружкой) глубоких рисок и приводящие к заклиниванию притира в отверстии. Скопление абразивных зерен на отдельных участках зоны доводки ведет к усиленному съему металла с детали в этом месте, что также ухудшает качество доведенной поверхности. Например, опыт доводки деталей топливной аппаратуры показывает, что скопление доводочной пасты на торце детали приводит к резкому увеличению конусности и повышению шероховатости поверхности отверстия на этом участке.

Вполне очевидно, что устранению указанных выше причин, затрудняющих повышение качества доводки, будут способствовать, например, регулирование и стабилизация удельного давления в зоне доводки, обеспечение равномерного распределения абразивных зерен по поверхности разжимного притира.

В настоящее время процесс доводки малых отверстий чрезвычайно трудоемок. В табл. 47 представлены данные ряда заводов по трудоемкости доводки отверстий в деталях топливной аппаратуры. Из таблицы видно, что продолжительность процесса доводки отверстий на ряде заводов как отечественных, так и зарубежных занимает до 38—52% от времени, необходимого на всю механическую обработку данной детали.

В этих условиях полная автоматизация процесса доводки отверстий крайне необходима. Она осложняется тем, что целесообразно обеспечить такой автоматический разжим притира, который был бы строго синхронизирован со съемом металла с детали и получаемым в процессе доводки износом притира. Только в этом случае возможно будет поддержание оптимального зазора в зоне доводки. Выше указывалось (см. гл. III), что в настоящее время произведена модернизация станков ОФ-26 и ОФ-16 и разработаны станки 3820 и 3820Д. Разжим притира в них осуществляется автоматически на каждый двойной ход. Однако в этих станках отсутствует синхронизация разжима притира со съемом металла с детали и износом притира, поэтому в них постоянно сохраняется возможность заклинивания притира в отверстии.

Доводка деталей может осуществляться различными способами нанесения абразива:

1) «намазыванием» притира доводочной пастой;

2) притирами, предварительно шаржированными абразивными зернами;

3) подачей абразивных зерен в зону доводки вместе с эмульсией.

Все названные виды доводки успешно применяются при обработке деталей на плоскодоводочных станках. Доводка малых отверстий осу-

ществляется лишь первым способом, применение двух последних с использованием существующего оборудования пока не дает положительных результатов. Происходит это потому, что основным условием получения цилиндрического отверстия правильной геометрической формы является равномерность распределения зерен по обрабатываемой поверхности и поддержание оптимального зазора между притиром и деталью. В условиях, когда невозможны регулирование и стабилизация удельного давления в зоне доводки или хотя бы регулирование подачи абразивной смеси в зону доводки, последних два метода не обеспечивают высококачественной доводки отверстия.

Вполне очевидно, что для повышения качества поверхности доведенного отверстия, увеличения производительности доводки малых отверстий необходимо не только дальнейшее развитие и совершенствование известного способа доводки отверстий свободным абразивом, но и разработка и исследование новых способов.

Технологические факторы, влияющие на точность абразивной доводки отверстий. Основные из них следующие: а) кинематика перемещения притира относительно детали; б) жесткость технологической системы; в) неточность установки приспособления относительно оси шпинделя станка; г) смещение оси притира в процессе доводки (гироскопический эффект); д) искажение геометрической формы цилиндра притира при его разжиме; е) тепловое расширение притира.

Характер возвратно-поступательного перемещения притира относительно детали оказывает влияние на продолжительность контакта притира и точки поверхности изделия рассматриваемого сечения.

Б. Н. Кириллин [146] выделяет два основных варианта обработки: доводка при длине хода притира, равной сумме длин отверстия и притира, и длине хода, меньшей суммы длины отверстия и притира.

В первом случае (рис. 68, а) каждое поперечное сечение цилиндрической поверхности детали (при равенстве скоростей $\bar{V}$ и $\bar{V}_1$) находится под воздействием притира одинаковое время, равное a/V . График зависимости продолжительности контакта притира t от длины отверстия — прямая линия BB_1 .

Во втором варианте (рис. 68, б, в) (при длине хода притира, большей или меньшей, чем его длина) график продолжительности контакта притира t представляет собой ломаную линию (участки $BB_1B_2B_3$ и $ГГ_1Г_2Г_3$). При этом продолжительность контакта детали с притиром не на всех участках одинакова. Наибольшая продолжительность наблюдается в средней части отверстия (участки B_1B_2 и $Г_1Г_2$); наименьшая — по концам отверстия (участки BB_1 , B_2B_3 , $ГГ_1$, $Г_2Г_3$). Когда длина хода притира больше его длины ($b > a$), наибольшая продолжительность контакта равна a/V , при $b < a$ она равна b/V .

Продолжительность контакта притира с деталью (по длине притира) в первом случае есть величина постоянная, равная A/V (рис. 68, а), а в остальных случаях (рис. 68, б, в) — переменная. На рис. 68, б справа пунктиром проведен график продолжительности контакта притира с деталью по длине притира. Наибольшая продолжительность контакта отвечает точке К.

Условно полагая, что доводочная паста распределена по притиру равномерно, можно считать, что съем металла с обрабатываемой поверхности почти прямо пропорционален продолжительности контакта притира и детали. Поэтому равномерность съема металла, обеспечение высокой точности доводки, очевидно, зависят в первую очередь от характера (ки-

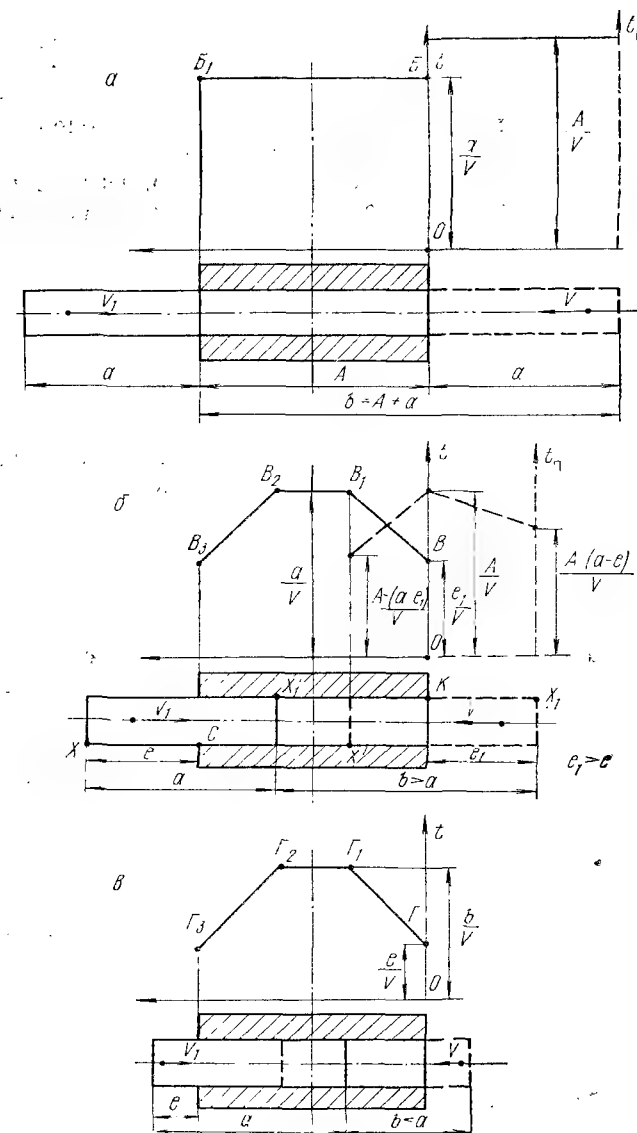


Рис. 68. Схема доводки отверстия с различным выходом притира из отверстия: а — при длине b , равной сумме длин детали A и притира a ; б — при длине $A + a < b > a$; в — при длине $b < a$

нематики) перемещения притира относительно детали. Согласно нашему предположению, случай обработки, представленный на рис. 68, а, относительно получения высокой точности доводки является идеальным. Однако неравномерность распределения пасты по притиру, задержка его в крайних положениях, скопление пасты на торцах детали и т. д. приводят к тому, что съем металла по концам отверстия всегда больше, чем в середине. Поэтому наиболее оптимален с точки зрения высокой производительности и точности случай, приведенный на рис. 68, б.

Точность обработки отверстия зависит не только от величины выхода притира за края обрабатываемой детали, но и от соблюдения равенства величин выхода притира с обеих сторон отверстия.

Каждая точка на притире при его движении описывает пространственную линию, которая в прямоугольной системе координат может быть выражена следующими параметрическими уравнениями:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi, \\ y &= r \sin \varphi, \\ z &= V_{\text{вп}} t_{\text{п}}, \end{aligned} \quad (73)$$

где $V_{\text{вп}}$ — скорость возвратно-поступательного перемещения, м/мин; φ — угол поворота притира относительно обрабатываемого отверстия; $t_{\text{п}}$ — продолжительность перемещения, сек; r — радиус притира, мм.

Выразим φ через $t_{\text{п}}$:

$$\varphi = \frac{\pi n}{30} t_{\text{п}}, \quad (74)$$

где n — число оборотов притира, об/мин.

Длина элементарного участка траектории притира равна

$$dM = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}. \quad (75)$$

Из формулы (73) имеем

$$\begin{aligned} dx &= -\frac{\pi r n}{30} \sin\left(\frac{\pi n}{30} t\right) dt_{\text{п}}, \\ dy &= \frac{\pi r n}{30} \cos\left(\frac{\pi n}{30} t\right) dt_{\text{п}}, \\ dz &= V_{\text{вп}} dt_{\text{п}}. \end{aligned} \quad (76)$$

Тогда

$$dM = \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n^2}{900} + V_{\text{вп}}^2} dt_{\text{п}}. \quad (77)$$

Проинтегрировав (77), получим

$$M = \int_0^{t_{\text{п}}} dM = \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n^2}{900} + V_{\text{вп}}^2} t_{\text{п}}. \quad (78)$$

Определим путь, проходимый точками (X), (X₁) вне обрабатываемого отверстия (см. рис. 68, б):

а) при движении вперед

$$M_{X_{e1}} = \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n^2}{900} + V^2} e_1 / V; \quad (79)$$

б) при движении назад

$$M_{X_e} = \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n_1^2}{900} + V_1^2} e / V_1, \quad (80)$$

где n , n_1 — числа оборотов притира или детали при движении притира соответственно вперед и назад; V , V_1 — скорости поступательного перемещения притира соответственно вперед и назад; $e = V_1 t_{\text{п}}$; $e_1 = V t_{\text{п}}$.

Теоретически основным условием сохранения идеальной цилиндричности рабочей поверхности притира будет выполнение процесса доводки по схеме, показанной на рис. 68, а. Для случаев, приведенных на рис. 68, б, в, таким условием является равенство $M_{X_{e1}} = M_{X_e}$. Поэтому основное условие достижения высокой точности отверстий при обработке их по схеме, представленной на рис. 68, б, в, — равенство следующих переменных величин:

$$n_1 = n, \quad V_1 = V, \quad e_1 = e. \quad (81)$$

Как указывалось выше, для данной схемы характерно снижение продолжительности контакта детали с притиром по концам отверстия. Однако этот недостаток в процессе доводки автоматически компенсируется некоторой интенсификацией процесса на упомянутых участках, чему способствуют ускоренный «поворот» расположенных на участках КХ₁ и ХС абразивных зерен, сопровождающийся сменой режущих участков зерен; дополнительное самопроизвольное затягивание в зону доводки свежих зерен, скопившихся по торцам детали, и некоторая задержка притира в отверстии. При определенных условиях процесса ($e_1 \neq e$) задержка притира в отверстии может создаваться принудительно. Этим и обеспечивается получение высокой точности геометрической формы отверстия.

Время задержки притира в отверстии можно установить на основе равенства $M_{X_{e1}} = M_X$, где $M_{X_{e1}}$ определяется по формуле (79), а

$$M_X = M_{X_e} + M_{X_{(V_1=0)}}; \quad (82)$$

M_{X_e} находим по формуле (80). Значение $M_{X_{(V_1=0)}}$ находится из формулы (78) при условии, что $V_1 = 0$:

$$M_{X_{(V_1=0)}} = \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n_1^2}{900}} \Delta t. \quad (83)$$

Здесь Δt — время задержки притира в отверстии.

На основе равенства $M_{X_{e1}} = M_X$ имеем

$$\sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n^2}{900} + V^2} \frac{e_1}{V} = \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n_1^2}{900} + V_1^2} \frac{e}{V_1} + \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n_1^2}{900}} \Delta t,$$

откуда

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n^2}{900} + V^2} \frac{e_1}{V} - \sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n_1^2}{900} + V_1^2} \frac{e}{V_1}}{\sqrt{\frac{\pi^2 r^2 n_1^2}{900}}} \quad (84)$$

При условии $n_1 = n$, $V_1 = V$, $\frac{\pi^2 r^2 n^2}{900} = C^2$

$$\Delta t = \frac{1}{VC} \sqrt{C^2 + V^2} (e_1 - e). \quad (85)$$

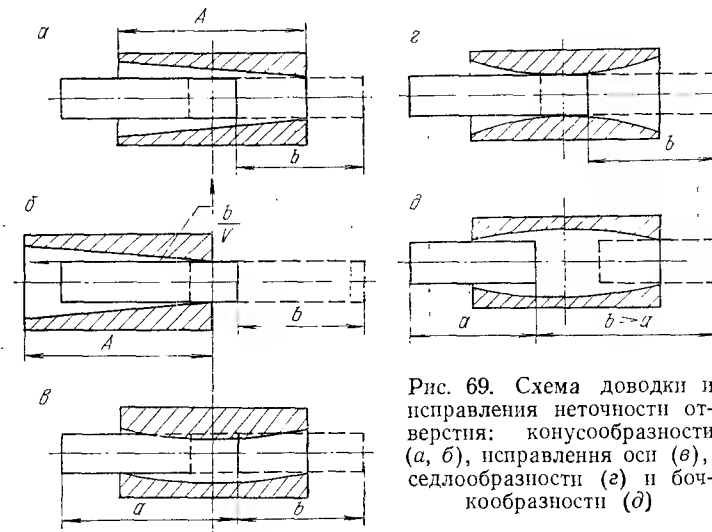
На рис. 69 представлены схемы доводки и исправления конусообразности, искривления оси, седлообразности и бочкообразности отверстий. Для быстрого исправления конусообразной формы отверстия (рис. 69, а) и увеличения срока службы притира можно рекомендовать смещение среднего положения возвратно-поступательного движения притира на линию торца детали (рис. 69, б). По мере исправления конусообразности положение детали, т. е. ее средней линии, возвращается к исходному. Исправление кривизны оси отверстия и седлообразности будет происходить наиболее интенсивно при минимальной длине хода притира (рис. 69, в, г). При исправлении отверстий, имеющих изогнутость оси, необходимо также применять притиры большой длины и оправки повышенной жесткости.

Как видно из рис. 69, д, наиболее интенсивное исправление бочкообразности возможно при максимальной длине притира и его хода. Так как исправление различных погрешностей формы отверстий требует применения специфических условий обработки, то при массовом производстве деталей их обычно сортируют по виду отклонения от цилиндричности и обрабатывают, используя соответствующую наладку станка. Положительную роль в этом отношении могут сыграть станки, механизм возвратно-поступательного перемещения притира в которых обеспечивает автоматическое снижение скорости перемещения притира в местах, где требуется большой сьем металла, и увеличение — в местах, где сьем минимальный. В качестве примера можно привести механизм с пневматическим приводом, механизмы со следящим приводом и т. д. [66].

В качестве обычного механизма для перемещения притира можно использовать гидравлическую систему цилиндр — поршень, которая обеспечивает минимальную задержку при изменении направления перемещения и постоянство скорости перемещения в прямом и обратном направлениях. Кривошипно-шатунный механизм не обладает таким

свойством и для перемещения притира не может быть рекомендован.

Нами изучалось влияние на точность доводимого отверстия таких переменных факторов, как неравенство скоростей возвратно-поступательного перемещения притира вперед и назад, величина выхода притира из отверстия, продолжительность задержания притира в отверстии. В результате экспериментов было установлено, что разность скоростей перемещения притира в отверстии и из него в 1—2 м/мин приводит к тому, что конусность доведенного отверстия возрастает в 1,5—2 раза как



при черновой, так и при окончательной доводке. Некруглость отверстия остается практически в тех же пределах. Одинаковая скорость перемещения притира в прямом и обратном направлениях была обеспечена на автоматизированной установке равенством объемов полостей гидравлического цилиндра, сообщающего возвратно-поступательные перемещения притиру [99].

Опытами установлено, что при малой длине притира (до 14 мм) непрямолинейность образующей возрастает в 1,5—2 раза. При недостаточном ходе притира (8—9 мм) и малой его длине доводимые отверстия имели бочкообразную форму. Лучшие результаты по точности были получены при длине притира 17—18 мм, что составляет 0,9—0,95 от длины доводимого отверстия, и длине хода 11—12 мм.

Конструктивная форма глухих отверстий не позволяет установить оптимальную величину выхода притира из отверстия. Поэтому доводку таких отверстий необходимо производить с незначительным выходом притира из отверстия. Требуемая точность может быть получена за счет кратковременной принудительной задержки притира в отверстии.

В проведенной нами серии экспериментов по доводке сквозных отверстий исследовалось влияние продолжительности задержания притира в отверстии (в интервале 1—10 сек) на его точность. Было установ-

лено, что при выходе притира с одной стороны 3 мм, а с другой 5 мм требуемая точность окончательной доводки обеспечивается задержанием притира в стороне меньшего выхода в течение 2—3 сек. Сравнение конечных результатов обработки (съем металла с детали, износа притира, шероховатости обработки) при оптимальном выходе притира из детали и при доводке с задержкой притира в отверстии показало, что практически получаемые при этом результаты одинаковые.

И. Е. Фрагиным и В. Г. Сафроновым [147] проведено исследование закономерностей исправления кривизны оси отверстий при доводке

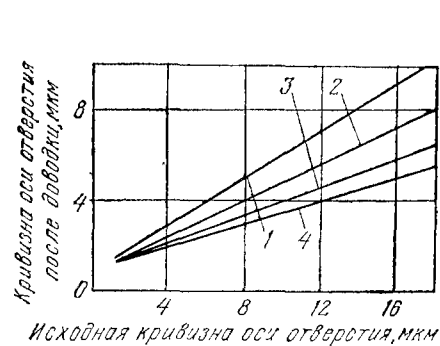


Рис. 70. Влияние исходной кривизны оси отверстия на ее кривизну после доводки в течение: 1—20 сек; 2—40; 3—55; 4—90 сек



Рис. 71. Влияние исходной кривизны оси отверстия на теоретический (1) и фактический (2) съем металла

плунжерной втулки топливного насоса ($\varnothing 8,5$ мм, длина 62 мм) свободным абразивом. Установлено, что снижение кривизны отверстий до 0,002 мм требует выполнения трех последовательных операций доводки, в то время как конусообразность и корсетность получаются в пределах допуска уже после двух операций доводки. На продолжительность обработки, необходимой для исправления исходной погрешности формы отверстия, оказывают влияние прежде всего исходное состояние формы отверстия и интенсивность съема металла в единицу времени.

В результате экспериментов установлено, что кривизна оси отверстия после доводки примерно пропорциональна исходной величине кривизны (рис. 70). Доводка осуществлялась на вертикально-доводочном станке чугунными разжимными притирами при постоянном режиме: окружной скорости притира — 6,5 м/мин; числе двойных ходов — 120 в 1 мин; длине хода притира — 60 мм. При доводке использовалась паста, состоящая из абразивного порошка (55%), олеиновой кислоты (25%), стеарина (9), парафина (5), керосина (6%). Эксперименты проводились с однократным намазыванием притира. Предварительная доводка осуществлялась с использованием микропорошка ЭБМ40.

Оптимальная продолжительность одного эксперимента составляла 70—80 сек, при двух последовательных доводках — по 75 сек, при исходной кривизне отверстия 10 мкм окончательная кривизна оси отвер-

стия составляла более 2 мкм, что по конструктивным требованиям больше допустимого значения.

Зависимость величины съема металла от исходной кривизны носит несколько иной характер (рис. 71). На рисунке представлены данные фактического и теоретического съема металла. Фактически снимаемый при исправлении кривизны слой в несколько раз больше теоретического. Это подтверждает существующее в теории доводки мнение, что из-за недостаточной жесткости притира при доводке длинных отверстий съем металла происходит не только с участков наименьшего радиуса, но и почти со всей поверхности отверстия. А. А. Пантелеев [148] оценку интенсивности исправления кривизны оси отверстия предложил производить с помощью коэффициента $k_{\text{и}}$:

$$k_{\text{и}} = \frac{H_1 - H_2}{\Delta R}, \quad (86)$$

где H_1 , H_2 — разность значений кривизны до и после доводки; ΔR — величина припуска, снятого за время доводки.

Величина $k_{\text{и}}$ может изменяться от нуля до единицы. Оптимальное значение $k_{\text{и}} = 1$. В этом случае наблюдается равенство теоретически необходимого и фактически снимаемого припусков и съем металла осуществляется не со всей поверхности, а лишь с участков, наиболее близко расположенных к оси отверстия. Во всех остальных случаях фактически снятый припуск больше теоретически необходимого. При $k_{\text{и}} = 0$ исправления кривизны оси отверстия практически не происходит.

На коэффициент $k_{\text{и}}$ оказывают влияние величина исходной и допустимой кривизны оси отверстия, конструкция притира, режим доводки, зернистость абразивного материала. Влияние первых двух факторов на величину $k_{\text{и}}$ представлено в табл. 48. Сравнение полученных данных показывает, что чем больше исходная погрешность, тем интенсивнее идет исправление ее.

Интенсивность исправления резко снижается по мере ужесточения требований в отношении допустимой кривизны оси отверстия. Очевидно, что чем больше допустимая кривизна оси отверстия приближается к нулю, тем больше линия фактического съема приближается к вертикальной прямой (левая штриховая линия на рис. 71). Это означает, что незначительное исправление кривизны в этих условиях связано с большими затратами времени на доводку отверстия. При этом доводочная паста с крупными абразивными зернами (№ 6 и М40) более интенсивно исправляет кривизну оси отверстия, чем паста зернистостью М28. Это, очевидно, связано с механизмом перемещения абразивных зерен в зазоре между притиром и деталью. Более крупные зерна меньше закрепляются в притире и в процессе работы больше перекатываются, чем мелкие. При перекатывании меньше возможности копирования формы обрабатываемого отверстия.

На Ярославском и Ногинском заводах топливной аппаратуры исследовалось влияние ряда факторов на коэффициент исправления кривизны оси втулки плунжера. Эксперименты проводились на станке

Коэффициенты интенсивности исправления кривизны k_n

Кривизна оси отверстия после доводки, мкм	Исходная кривизна оси отверстия, мкм									
	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
2	0,05	0,07	0,10	0,18		—	—	—	—	—
3	—	0,16	0,18	0,20	0,22	0,29	—	—	—	—
4	—	—	0,22	0,23	0,24	0,31	0,38	0,42	—	—
5	—	—	—	0,38	0,39	0,40	0,43	0,50	0,55	0,60

ОФ-26, имевшем автоматический разжим притира с непрерывной подачей (мм/дв. ход) [149].

Из рис. 72 видно, что коэффициент интенсивности k_n близок к нулю до значения t , близкого к 0,5, затем он резко возрастает с увеличением относительной длины притира, достигая максимального значения при $t=0,95$. Это значение оптимальное, так как дальнейшее увеличение t не ведет к росту коэффициента интенсивности исправления непрямолинейности.

Установлено, что с увеличением подачи коэффициент интенсивности уменьшается. Это можно объяснить тем, что с увеличением подачи растет величина съема металла (знаменатель ΔR в формуле (86)). Значение же разности H_1-H_2 (формула (86)) с увеличением подачи остается без изменения, так как, очевидно, способность притира к исправлению непрямолинейности оси определяется главным образом его жесткостью. В итоге значение коэффициента интенсивности уменьшается.

Коэффициент k_n уменьшается также с увеличением относительной длины двойного хода притира (отношение длины двойного хода притира к длине отверстия). Уменьшение относительной длины двойного хода ниже 0,6 хотя и увеличивает k_n , но резко снижает качество обработанной поверхности. Установлено, что чем грубее исходная поверхность отверстия, тем интенсивнее происходит исправление непрямолинейности его оси.

В процессе доводки возможно несколько схем обработки:

1) притир вращается, одновременно совершая возвратно-поступательное перемещение относительно неподвижной детали; 2) притир не вращается, имеет только возвратно-поступательное перемещение относительно детали, а вращается деталь; 3) притир неподвижен, деталь и вращается, и перемещается возвратно-поступательно относительно притира.

Одна из причин, заставивших конструкторов станков отказаться от вращения притира в процессе обработки, обусловлена гироскопическим эффектом. При вращении притира биеение его или прогиб оправки приводят к смещению его оси вращения. В процессе обработки ось притира и расположенная на нем деталь совершают в пространстве сложное движение. С появлением смещения оси деталь будет обработана с опреде-

ленной погрешностью. Гироскопический эффект исчезает, если ось притира остается неподвижной. Поэтому в высокоточных станках для доводки отверстий притир не вращается.

Имеющаяся тенденция к ужесточению технических требований, предъявляемых к размерной точности, точности геометрической формы и качеству рабочих поверхностей, связана с необходимостью повышения надежности работы и сроков службы различных машин, приборов и агрегатов. Характерным примером деталей, имеющих высокоточные (прецизионные) отверстия, являются детали дизельной топливной аппаратуры. К размерной точности, точности геометрической формы (в

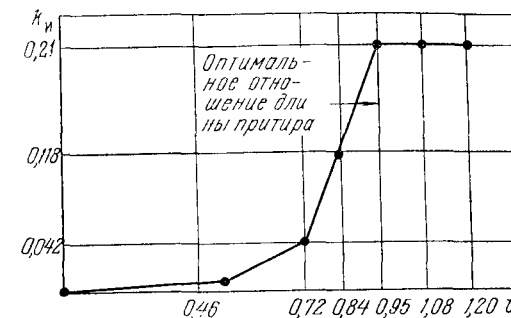


Рис. 72. Зависимость коэффициента интенсивности исправления кривизны k_n от относительной длины притира t

продольном и поперечном сечениях), а также к шероховатости рабочих поверхностей деталей топливной аппаратуры предъявляются очень высокие требования, которые оговорены рядом стандартов (например, ГОСТ 9928—71, 9927—71, 8334—68 и др.). При обработке отверстий в таких деталях необходимо обеспечить точность формы в продольном сечении до 0,0005 мм, некруглость 0,0002—0,0005 мм, овальность до 0,0005 мм, шероховатость обработанной поверхности 11—12-го классов. Шероховатость деталей топливной аппаратуры, выпускаемых, например, фирмой «Американ Бош», установлена в пределах 10—136 классов. Следует отметить, что в отличие от отечественных стандартов этой фирмой к сопряженным прецизионным поверхностям предъявляются различные требования по шероховатости. Так, шероховатость цилиндрической поверхности отверстия должна соответствовать 10-му классу, а сопряженная с ней цилиндрическая поверхность вала—136. Согласно требованиям отечественных стандартов, сопряженные поверхности вала и отверстия рекомендуется делать одинаковой шероховатости.

Влияние ряда факторов на распределение величин отклонений профиля продольного сечения отверстия во втулке плунжера при доводке ее на станке ОФ-26 исследовал М. Л. Локшин. Установлено, что распределение подчиняется закону Максвелла. Исследование влияния подачи S , относительной длины хода притира t и его относительного износа ϵ на параметр α (на дисперсию распределения Максвелла) показало, что с увеличением t и S параметр α уменьшается и увеличивается с ростом ϵ . Уменьшение параметра α при заданном допуске равносильно увеличению вероятного процента годности отверстий по отклонению профиля продольного сечения, а увеличение α , наоборот, снижает процент годных деталей. Зависимость α от t , S , ϵ имеет вид

$$\alpha = 0,275 - 0,569t - 0,965S + 0,686\epsilon. \quad (87)$$

Сравнения процентов годности, определенных методом статистического анализа при измерении 3 тыс. втулок плунжера на ЯЗТА (г. Ярославль) и путем расчета по формуле (87), показали удовлетворительную сходимость результатов. Эти данные приведены в табл. 49.

Нами [99] при исследовании процесса доводки малых отверстий на установке, обеспечивающей постоянный крутящий момент в зоне доводки, было получено почти полное совпадение разброса величин отклонений конусообразности, некруглости и искривления оси с величинами

Таблица 49

Расчетные и экспериментальные данные по определению годности втулок плунжеров на ЯЗТА (по данным М. Л. Локшина)

Параметры	Вид доводки	
	предварительная	окончательная
Относительная длина хода	0,7	0,7
Подача, мкм/дв.ход	0,30	0,08
Относительный износ притира	1,10	0,55
Допустимое отклонение профиля продольного сечения, мкм	1,0	0,6
Значение параметра α (по формуле (87))	0,33	0,20
Вероятный теоретический процент годности (закон Максвелла)	95,7	97,1
Процент годности, установленный статистическим анализом	96,6	90,0

допусков, установленных стандартами. Наибольшая точность обеспечивалась при доводке с крутящим моментом $2 \text{ кг} \cdot \text{мм}$ ($19,62 \text{ н} \cdot \text{мм}$) и сочетанием крутящего момента $18 \text{ кг} \cdot \text{мм}$ ($176,58 \text{ н} \cdot \text{мм}$) (30% времени доводки) и $2 \text{ кг} \cdot \text{мм}$ ($19,62 \text{ н} \cdot \text{мм}$) (70% времени обработки). Двухступенчатая доводка обеспечивает повышение точности обработки в 1,5—2,1 раза, непрерывная же доводка с $M_{\text{кр}} = 2 \text{ кг} \cdot \text{мм}$ ($19,62 \text{ н} \cdot \text{мм}$) повышает точность в 2—2,5 раза по сравнению с ручной.

Исследование микротвердости и остаточных напряжений в поверхностном слое после окончательной доводки отверстий в названных выше деталях, изготовленных из сталей ШХ15, ХВГ и 18Х2Н4ВА, показало, что на поверхности наблюдаются напряжения сжатия, которые потом переходят в напряжения растяжения. Согласованность между напряжениями и микротвердостью отсутствует, за исключением стали 18Х2Н4ВА. Здесь постепенное уменьшение напряжений сжатия сопровождается снижением микротвердости, на распределении которой, очевидно, сказывается постепенное снижение содержания углерода в поверхностном слое детали.

6. Тонкая алмазная обработка инструментом с ориентированными зернами

Шлифование в отличие от других видов обработки дает возможность: 1) автоматически изменять режущую способность круга в течение одного оборота детали (в зависимости от изменения величины припуска) и усиливать за счет этого эффекта скругление формы детали; 2) ослаблять вследствие многопроходности влияние исходных погрешностей формы на геометрическую точность окончательно шлифованных деталей; 3) плавно изменять процесс обработки в направлении от более грубого к более тонкому.

К недостаткам данного процесса можно отнести далеко не полное использование режущих свойств отдельных абразивных зерен. Причина этого — неблагоприятное (хаотическое) расположение их в объеме шлифовального круга. По этой же причине снижается интенсивность съема металла, часто возникают так называемые штриховые и другие виды ожогов шлифованной поверхности, образуются структурные концентраторы напряжений и даже микротрещины. Следовательно, изыскание методов повышения режущей способности абразивных инструментов — актуальная задача. Эта задача успешно решается путем ориентации абразивных (или алмазных) зерен, при этом существенно улучшаются условия резания металла каждым зерном и инструментом в целом.

Как отмечалось выше, отдельные пороки поверхностного слоя металла в виде шлифовочных ожогов, трещин могут частично переходить от операции к операции, т. е. они обладают свойством технологической наследственности. Пооперационно копируются и геометрические погрешности. Технологическая наследственность всех этих факторов устраняется (или резко ослабляется), если резание производить инструментом с ориентированными зернами. При этом ранее созданный поверхностный дефектный слой срезается, а новые дефекты почти не образуются, а если и образуются, то в значительно меньшей степени. Следовательно, создание нового алмазно-абразивного инструмента с ориентированными зернами — эффективное средство повышения точности обработки и улучшения эксплуатационных свойств шлифованных деталей [2, 90].

Исследование данного вопроса показало возможность управления режущими свойствами алмазно-абразивного инструмента путем определенной ориентации его зерен. Изучению подвергалась операция хонингования [90].

Алмаз как инструментальный материал обладает уникальными свойствами: высокой твердостью, непревзойденной износостойкостью, хорошей теплопроводностью, низким коэффициентом линейного расширения и трения. Стойкость алмазного хонинговального инструмента превышает стойкость аналогичного абразивного в 100—150 раз. Перечисленные преимущества алмазного инструмента достигаются повышением качества алмаза как режущего материала, в то время как сама структура инструмента не претерпевает изменений. Как в абразивных, так и в ал-

мазных брусках режущие зерна расположены относительно плоскости резания хаотично.

Перечисленные выше преимущества алмазных зерен и недостатки структуры инструмента привели к необходимости создания качественно нового алмазного инструмента, у которого зерна ориентированы относительно плоскости резания. Это позволяет рассматривать процесс алмазной обработки как процесс резания большим количеством микро-

резцов с определенными передними углами (рис. 73).

Особое значение для алмазного инструмента с ориентированными зернами приобретают геометрические параметры зерен,

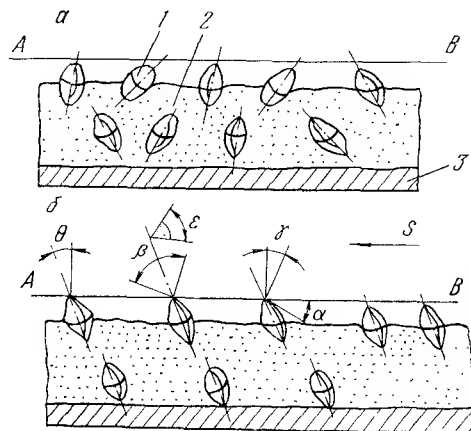


Рис. 73. Принципиальная схема ориентации алмазных зерен в связке инструмента: а — существующая схема расположения зерен (оси зерен расположены хаотично) (AB — плоскость резания; 1 — алмазные зерна; 2 — связка; 3 — державка); б — схема упорядоченного расположения зерен

такие, как форма зерна, радиус округления вершины ρ , угол заострения вершины β и их взаимосвязь [2, 90].

На основании примерно 2 тыс. замеров и результатов статистической обработки эмпирических данных установлено следующее.

1. Высокий процент зерен октаэдрического и кубического габитуса преобладает в марках АКС и АСС. Зерна марки АСВ, предназначенные для ориентации, необходимо сортировать по форме.

2. Распределение радиусов округления вершин подчиняется закону модуля разности. Алмазные зерна случайной формы имеют тенденцию к снижению абсолютных величин ρ с уменьшением зернистости. Средние значения радиусов округления вершин зерен для исследованных зернистостей находятся в пределах 6—9 мкм.

3. Для инструмента с ориентированным расположением алмазных зерен абсолютная величина угла при вершине β влияет на выбор угла ориентации. Математическая обработка замеров углов при вершине показала, что опытные данные могут быть представлены в виде кривых распределения и соответствующих этим кривым суммарных характеристик $m = f(\beta)$.

Суммарные характеристики могут быть выражены функцией Розина — Рамлера

$$M_i = 100e^{-\left(\frac{\beta}{\beta_c}\right)^n}, \quad (88)$$

где M_i — суммарный выход углов β по полюсу; β — угол заострения зерна; β_c, n — параметры формулы.

Средние значения параметров

Таблица 50

Марка алмазного порошка	Зернистость (ГОСТ 9206—59)	Среднее значение радиуса округления, мкм	Среднее значение угла вершины, град (рад)	Значение параметров	
				β_c	n
АСВ	25	0,0073	69,3 (1,21275)	1,47	3,00
	20	0,0087	67,1 (1,17425)	1,43	2,88
	12	0,0076	63,0 (1,10250)	1,40	2,89
АКС	25	0,0061	79,2 (1,38600)	1,65	4,02
	20	0,0071	76,7 (1,34225)	1,61	4,00
	12	0,0074	74,0 (1,29500)	1,62	3,84

Параметр β_c представляет собой угол таких зерен, больше которых в объеме выборки содержится 36,8%. При $\beta = \beta_c$ $M_i = 36,8\%$. Если $n = \infty$ и $\beta < \beta_c$, то суммарный выход по полюсу равен 100%. С уменьшением показателя степени кривая распределения принимает более пологий вид, и при $n < 1$ максимум исчезает.

Средние значения радиуса округления вершин, углов вершин и параметров β_c и n для алмазного порошка АСВ и АКС приведены в табл. 50.

Для суждения о режущей способности инструмента с ориентированными зернами необходимо вначале изучить работу одного ориентированного зерна [90]. В частности, при помощи математической обработки статистических данных необходимо исследовать геометрию зерна и некоторые вопросы динамики процесса резания-царапания одиночным зерном. Изучалось влияние на этот процесс положения зерна относительно плоскости резания. Обработывались образцы стали 45 каленой и сырой и чугуна СЧ 15-32. Алмазные зерна АСК 40 зачеканивались в державке и выставлялись в планшайбе под определенным передним углом от $+5^\circ$ до -80° (от $+0,0875$ до $-1,4$ рад). Для измерения сил резания был сконструирован и изготовлен специальный тензометрический динамометр, позволяющий замерять величины составляющих сил от 0,2 до 2,5 кГ (от 1,962 до 24,525 н).

При установлении зависимости между глубиной резания и площадью поперечного сечения канавки было замечено, что действительные сечения канавки отличаются от теоретических. Даже ориентированные зерна при одинаковой глубине резания a_z имеют различные площади сечения f . Это различие зависит от колебания угла ϵ — 45 — 150° ($0,7875$ — $2,625$ рад), положения зерна относительно направления движения (ребром или гранью) и от погрешностей, вносимых передним углом. Зависимость между a_z и f может быть представлена уравнением

$$f = Aa_z^n, \quad (89)$$

где A, n — параметры.

Вследствие нестабильности процесса резания в зоне малых глубин уравнение для f рассматривается отдельно для $a_z < \rho$ и $a_z > \rho$. Выведены коэффициенты k_1 и k_2 , которые вносят поправку в теоретическую фор-

мулу для определения площади поперечного сечения канавки. По результатам исследований сделан вывод о том, что силы, возникающие в процессе микрорезания, следует рассматривать не относительно глубины резания, а относительно площади поперечного сечения канавки, т. е. как удельные силы резания.

Исследованиями сил резания при различных значениях переднего угла установлено: 1) алмазные зерна с положительными углами γ имеют весьма низкую стойкость; 2) зерна с передними углами от 0 до -5° (от 0 до $-0,0875 \text{ рад}$) выкрошивались частично в зависимости от случайности их расположения (в «твердом» или в «мягком» направлении); 3) зерна с углами $70-80^\circ$ ($1,225-1,4 \text{ рад}$) при выставлении на глубину a_z больше ρ почти не образовывали канавок, а лишь выглаживали поверхность. Усилие на одно зерно находилось в пределах $1000-1500 \text{ гс}$. Анализ построенных в логарифмических координатах $\lg a_z - \lg f$ графиков показывает, что для участков прямых $a_z < \rho$ и $a_z > \rho$ сохраняется общность закона зависимости, но на разных количественных уровнях.

Потенцируя уравнения для прямых в логарифмических координатах, получаем ряд уравнений зависимости удельной силы от площади поперечного сечения канавок при различных передних углах. Общий вид уравнения для определения удельных сил резания

$$p = Af^{-n}, \quad (90)$$

где f — площадь поперечного сечения канавок, мм^2 .

Соотношение между нормальной и тангенциальной силами резания изменяется с увеличением отрицательной величины переднего угла от 0,8 до 2. Уменьшение P_y приводит к снижению удельного расхода алмазов, а величина P_z оказывает влияние на выбор связки.

Анализ профилограмм образованных канавок и навалов у их краев в зависимости от величины переднего угла позволил установить значения коэффициента ψ :

$$\psi = \frac{f - f_n}{f}, \quad (91)$$

где f_n — суммарная площадь навалов на краях канавки, мм^2 . Чем ниже значение коэффициента ψ , тем меньшее количество металла уходит в стружку и больше величина пластических образований. Обобщенные результаты проведенных исследований по резанию одиночным алмазным зерном позволяют установить оптимальные передние углы. Наибольший съем металла производят зерна, расположенные к плоскости резания под углом $\gamma = -5 \div -20^\circ$ ($-0,0875 \div 0,350 \text{ рад}$). При углах $\gamma = -40 \div -60^\circ$ ($-0,7 \div 1,05 \text{ рад}$) происходит алмазное выглаживание поверхности, обеспечивающее снижение микронеровностей и упрочнение поверхностного слоя. Величину заднего угла α для алмазных зерен следует принимать $8-10^\circ$ ($0,14-0,175 \text{ рад}$). Угол ориентации алмазных зерен θ определяется из соотношения

$$\theta = 90 - \frac{\beta}{2} - \alpha, \quad (92)$$

при этом $\gamma = 90^\circ - \alpha - \beta$.

Тогда, решая совместно уравнения, получаем

$$\theta = \frac{90 - \gamma - \alpha}{2}. \quad (93)$$

Ориентация алмазных зерен в связке осуществляется в магнитном поле постоянного тока с напряженностью $2000-3000 \text{ эрст}$ [128]. Алмаз диамагнитен, поэтому, применяя в качестве ориентира магнитное поле, зерна алмаза нужно металлизировать. Металлизация зерен осуществляется на вакуумной установке РР-600 с рабочим вакуумом $1 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$. Ионная очистка поверхности алмазных зерен, нанесение слоя магнитного материала (сталь Ст. 3 или армо-железо) контролируются потоком ионов, проходящих через металлическую пленку, и фиксируются ионным фотоэлементом с отсчетным устройством. Отбор качественно металлизированных зерен производится постоянными магнитами с отключающимся магнитным полем.

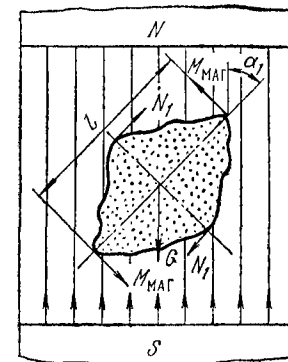


Рис. 74. Схема сил, действующих на зерно в процессе его ориентации

Необходимое условие для ориентации зерен в среде с малым коэффициентом вязкости — наличие момента со стороны магнитного поля M_{mag} , превышающего по абсолютной величине механический момент $M_{\text{мех}}$ и размагничивающий фактор N_i (рис. 74). Величина последних обуславливается весом зерна, размером, формой и слоем металлизации. Если большая диагональ зерно расположена под углом α_1 , тогда

$$M_{\text{mag}} = M_0 H \sin \alpha_1, \quad (94)$$

где M_0 — магнитный момент нанесенного магнитного слоя; H — напряженность поля.

Величина M_0 зависит от магнитных свойств материала, которым металлизировано зерно:

$$M_0 = Jv. \quad (95)$$

Здесь J — намагниченность; v — объем слоя металлизации.

Механический момент

$$M_{\text{мех}} = k_0 \frac{Gl}{2} \text{ дин} \cdot \text{см}, \quad (96)$$

где G — сила веса, действующая на металлизированное зерно; l — длина наибольшей диагонали; k_0 — коэффициент, учитывающий вязкость среды.

Выбор и испытания различных связок, удовлетворяющих условиям ориентации в них зерен алмаза, показали, что наиболее эффективной для хонингования оказалась эпоксидная смола ЭД-6 с применением пластификатора МГФ-9 и отвердителя полиэтиленполиамина.

Для улучшения физико-механических свойств связки было исследовано влияние количества и качества наполнителя на величину предела прочности связки на изгиб, разрыв, сжатие, ударный изгиб, твердость и теплостойкость по Мартенсу. Результаты исследования показали, что оптимальные прочностные параметры имеет связка с наполнителем медным порошком ПМ-2 при концентрации 50 в. ч. на 100 в. ч. ЭД-6. Недостатком связки на основе эпоксидного компаунда является низкая теплостойкость — 70—90 °С (343—363 °К), поэтому она применима только при изготовлении хонинговального инструмента.

Исследованиями, проведенными с целью определения величины выступания ориентированных зерен над уровнем связки, установлено, что с увеличением зернистости от АС10 до АС25 средняя высота выступания зерна находится в пределах 7—15 мкм. Среднее количество зерен на 1 мм² поверхности бруска изменяется при той же зернистости от 60 до 9 шт. Количество алмазных ориентированных зерен на единице поверхности хонинговального бруска Z_3 и расстояние между ними L с погрешностью 8—10% для 100%-ной концентрации алмаза в инструменте можно определить по формулам

$$Z_3 = 0,225H^2 \operatorname{tg}^{1,4} \frac{\varepsilon}{2}, \quad (97)$$

$$L = 1,88H' \sqrt[3]{\operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2}}, \quad (98)$$

где H' — средняя величина размера зерна.

Величины осевых усилий $P_{ос}$ и крутящих моментов $M_{кр}$ измерялись при хонинговании образцов на специальном тензометрическом динамометре при переменных значениях окружной скорости v_0 , скорости возвратно-поступательного движения хона $v_{в.п}$ и удельном давлении p . Испытаниям подвергались алмазные ориентированные и неориентированные бруски АСК16 100%-ной концентрации на эпоксидной связке.

В результате анализа тензометрических замеров усилий резания стали и чугуна установлено, что ориентация алмазных зерен снижает суммарные усилия хонингования на 60—65% при обработке чугуна, на 55—60% при обработке стали 45 некаленной и на 30—35% стали 45 закаленной. Помимо снижения усилий хонингования, брусками с ориентированными зернами алмаза получено увеличение съема металла на 15% для стали 45 закаленной, на 20% для стали 45 некаленной и чугуна СЧ 15-32. Удельный расход алмазов у брусков с ориентированными зернами на 8% ниже, чем у неориентированных, и в 5 раз меньше по сравнению с аналогичными неориентированными брусками, выпускаемыми инструментальной промышленностью. В процессе исследования бруски с ориентированными зернами алмаза показали уменьшение шероховатости на два разряда (и до одного класса) по сравнению с неориентированными.

Созданный по разработанной технологии инструмент с ориентированными зернами алмаза по сравнению с аналогичным инструментом с неориентированными зернами позволил увеличить число активных зерен, участвующих в процессе формообразования поверхности, от 10—17% от теоретического количества зерен, расположенных на 1 см² поверхности инструмента, до 45—60%. Создаваемые ориентацией благоприятные углы резания на каждом зерне и малые значения радиусов округления вершин зерен позволяют успешно осуществлять процесс тонкого резания (с глубиной резания 6—10 мкм). При этом снижается теплообразование, что способствует созданию в поверхностном слое напряжений сжатия.

Установлены следующие оптимальные режимы хонингования брусками на органической связке: скорость вращательного движения инструмента $V=47—50$ м/мин; скорость возвратно-поступательного движения 6—8 м/мин; удельное давление бруска на обрабатываемую поверхность $p=3—4$ кГ/см² (294,3—392,4 кН/м²); снимаемый припуск (на сторону) — 0,03—0,035 мм.

Обработка сталей и чугуна алмазным инструментом с ориентированными зернами значительно снижает силы трения, которые обычно вызывают появление надиров и наплывов металла. Испытания указанного инструмента в производственных условиях цеха гидротрансмиссии БелАЗ доказали возможность получения инструментом зернистостью АСВ12 100%-ной концентрации шероховатости поверхности 11-го класса, тогда как при обычном алмазном инструменте такая зернистость обеспечивает шероховатость 8—9-го классов [128].

По технологическим возможностям ориентация зерна позволила дифференцировать хонинговальный инструмент в зависимости от предъявляемых требований на: а) инструмент, обеспечивающий максимальную производительность (здесь зерна ориентированы так, что происходит интенсивный процесс резания); б) инструмент, обеспечивающий минимальную шероховатость (с такой ориентацией зерен, при которой преобладает процесс выглаживания и упрочнения за счет поверхностной пластической деформации). Возможны варианты спаривания двух разновидностей инструмента, что обеспечит высокую производительность, малую шероховатость и необходимые физико-механические свойства обработанной поверхности.

Проведенными расчетами, конструкторско-технологическими разработками и исследованиями доказана возможность создания качественно нового шлифовального инструмента с ориентированным расположением алмазных зерен.

7. Экспериментальное определение оптимальных условий полирования, обеспечивающих наилучшее качество поверхности

Результаты наших экспериментов по полированию закаленных и отшлифованных колец шарикоподшипников согласуются с нашей точкой зрения на физическую связь между различными технологическими факторами и качеством полированной поверхности [90].

Полировались желоба внутренних колец шарикоподшипника № 306. Вся партия колец была подобрана с одинаковыми исходной твердостью ($HRC\ 62$) и шероховатостью поверхности после шлифования (8а класс). В первом цикле экспериментов работа проводилась на полировальном автомате ПАВ-1. На нем имеются два полировальника: задний — для предварительного полирования и передний — для окончательного. Для установления более четких технологических закономерностей работу вели на одном полировальнике. Каждый показатель подсчитывался как среднеарифметическое пяти показателей.

Полирование при различном времени контакта полировальника с деталью. Опыты проводились при следующих технологических условиях: давление на полировальнике 35 кг/см^2 ($343,35\text{ н}$); скорость вращения шпинделя изделия $V=5,1\text{ м/сек}$ (число оборотов $n=2800\text{ об/мин}$ (294 рад/сек)); зернистость абразивной шкурки 150^2 ; число двойных качаний полировальника в 1 мин 160; угол качания 10° ($0,175\text{ рад}$). Состав поверхностно-активной полирующей пасты следующий: абразивного порошка 75%, стеарина 15, вазелина 8, керосина 2%. Зернистость абразивного порошка 280; время полирования (машинное время) 1,5; 2; 4 сек. Установлено, что с увеличением времени полирования шероховатость поверхности уменьшалась. Так, времени 1,5 сек соответствует шероховатость 9а—9б класса ($H_{ск}=0,3\text{ мкм}$)³; времени 4 сек — класс 10б—10в ($H_{ск}=0,12\text{ мкм}$). Начиная от 2—2,5 сек 10-й класс шероховатости выдерживался стабильно. С учетом производительности и качества поверхности оптимальное время полирования 2,5—3 сек.

На полированной поверхности создается наклеп, величина которого оценивается микротвердостью. Если после шлифования микротвердость составляла 826 кг/мм^2 ($8109,06\text{ Мн/мм}^2$), то после полирования в течение 1,5 сек она стала равной 879 кг/мм^2 ($8622,99\text{ Мн/мм}^2$) и при 4 сек — 906 кг/мм^2 ($8887,86\text{ Мн/мм}^2$). Микротвердость во всех опытах измерялась при нагрузке на алмазную пирамиду 20 Г ($0,02\text{ кг}$, или $0,1962\text{ н}$).

Анализируя значения микротвердости, можно сделать вывод, что с увеличением времени полирования (в пределах опыта) она увеличивается. Объясняется это пластическими деформациями микрорельефа при резании и, следовательно, появлением наклепа в тончайшем поверхностном слое. О наличии резания говорят вылетающие из зоны обработки искры (подобно шлифованию).

После шлифования наклеп на поверхности, безусловно, имеется, но при измерении микротвердости алмазная пирамида, вероятно, попадает в зону отпущенного при шлифовании слоя, и потому фиксируется пониженная микротвердость. При полировании этот дефектный слой удаляется и обнажается более твердая поверхность.

Итак, эксперименты показывают, что фактор времени влияет на величину шероховатости полированной поверхности.

Принятый критерий количественной оценки величины шероховатости $H_{ск}$ и $H_{ср}$ является усредненным показателем. Отдельные глубокие царапины или остаточные шлифовочные риски не могут существенно изменить численного выражения $H_{ск}$ и $H_{ср}$. Тем не менее они, являясь геометрическими концентраторами напряжений, резко снижают эксплуатационные качества поверхности и могут явиться началом усталостного выкрошивания.

Теоретический коэффициент концентрации напряжения в упругой зоне около риски

$$\alpha_T = 1 + 2\sqrt{t/r}, \quad (99)$$

где t — глубина риски; r — радиус закругления ее основания.

Таким образом, концентрация напряжения около риски зависит только от ее глубины и радиуса закругления дна.

Характерно, что действие одного концентратора напряжения сильнее действия нескольких, рядом расположенных. Это объясняется следующим: концентратор, повышая напряжение у дна, одновременно снижает напряжение в соседних местах. Появление в этих местах добавочных концентраторов более «мягких», чем первый, вызовет около их дна концентрацию напряжения и снижение напряжения у первого концентратора, т. е. добавочные концентраторы будут способствовать более равномерному распределению напряжений.

Взаимно разгружающее действие многих концентраторов напряжения зависит от отношения расстояния между концентраторами к их глубине. Чем меньше это отношение, тем выше взаимно разгружающее действие, т. е. тем меньше коэффициент концентрации.

Теоретический коэффициент концентрации напряжения в упругой зоне при наличии многих мелких концентраторов

$$\alpha_T = 1 + 2\sqrt{\gamma t/r}, \quad (100)$$

где γ — коэффициент, зависящий от отношения расстояния между концентраторами S и их глубиной t .

С уменьшением отношения S/t концентрация напряжения снижается, а при $S/t \approx 10$ взаимное разгружение концентраторов прекращается, и они начинают действовать как единичные изолированные надрезы (царапины). Этот вопрос имеет важное значение для изделий, к поверхностям которых предъявляются повышенные требования.

Можно сказать, что технологически полирование гарантирует получение шероховатости 10-го класса, определяемой приборами, при этом кое-где могут остаться следы шлифования. Но чтобы этого избежать, основное внимание нужно обращать на величину съема металла и цикл полирования строить таким образом, чтобы к началу процесса выглаживания был срезан весь шлифовочный микропрофиль, т. е. он должен быть срезан силой металла до низшей точки исходного микропрофиля поверхности. После выглаживания останутся лишь риски, образовавшиеся в процессе полирования, которые очень мелкие и вполне допустимы.

На основе исследований можно рекомендовать съем металла толщиной от 0,02 до 0,025 мм на диаметр, при котором гарантируется полное

¹ В опытах во всех случаях площадь контактной поверхности полировальника с деталью была равна примерно 2 см^2 ; при этом величина удельного давления легко может быть подсчитана.

² Здесь и в параграфе 8 данной главы зернистость приведена в дюймовой системе.

³ Здесь и ниже оценка шероховатости поверхностей приведена по $H_{ск}$.

удаление шлифовочных рисок (если исходная шероховатость была 7—8-го классов). Для этого необходимо установить время полирования 5—6 сек.

В настоящей работе ставилась задача установить закономерность изменения шероховатости в зависимости от режимных и других технологических факторов, т. е. определить, при каких условиях можно гарантированно получить шероховатость 10—11-го классов. Найденные оптимальные режимы и другие технологические условия полирования

Таблица 51

Условия проведения опытов

Скорость вращения детали V , м/сек	Число оборотов детали n , об/мин (рад/сек)	Класс шероховатости полированной поверхности	$H_{\text{ск}}$, мкм
3,6	2000 (210)	8в	0,4
5,1	2800 (294)	9б	0,3
5,9	3200 (336)	10а	0,18

можно рекомендовать для общего машиностроения. При особых дополнительных требованиях главной задачей нужно считать обеспечение необходимого съема металла и варьировать в основном фактором времени, т. е. несколько его увеличивать.

Полирование с различной скоростью вращения детали. Эксперименты проводились в прежних исходных условиях, изменялась лишь скорость вращения полируемой детали. Результаты экспериментов сведены в табл. 51.

Как видно из таблицы, с увеличением скорости вращения детали шероховатость полированной поверхности уменьшается. При давлении на полировальник 35 кГ (343,35 н) происходит резание абразивными зернами, но при низких скоростях вращения в зоне контакта не хватает тепла для того, чтобы в достаточной мере размягчился металл и произошло пластическое сглаживание микрорельефа. С повышением скорости вращения тепла для этих целей вполне достаточно.

Нами установлено, что для стабильного получения шероховатости поверхностей лучше работать на скоростях 8—10 м/сек. С увеличением скорости вращения детали микротвердость увеличивается. Так, при скорости 3,6 м/сек она равна 865 кГ/мм² (8494,65 Мн/мм²), а при 5,5 м/сек — 920 кГ/мм² (9025,2 Мн/мм²). Это объясняется тем, что быстро вращающаяся деталь значительно лучше охлаждается, следовательно, тепловое воздействие инструмента по времени короткое и явление отбоя не проявляется в такой степени, как при низких скоростях и более длительном тепловом воздействии.

Сравнивая тепловые процессы в контактной зоне при шлифовании и полировании, можно сделать следующие выводы. Поскольку скорость резания при полировании в 5—6 раз ниже скорости шлифования, то контактная температура будет ниже, чем при шлифовании. На основе опыта по полированию деталей шарико- и роликоподшипников замечено,

что ожоги поверхности здесь бывают очень редко, чего нельзя сказать о шлифовании. Скорость вращения детали при полировании в 7—8 раз выше скорости ее при шлифовании, в результате чего резко снижается концентрация тепла в каждой элементарной площадке полированной поверхности.

Полирование при различном давлении на полировальник. Скорость полирования принята равной примерно 6 м/сек, время полирования — 3 сек. Остальные условия эксперимента оставались прежними. Давление на полировальник, осуществляемое пружиной, принималось равным 12, 27 и 42 кГ (117,72; 264,87 и 412,02 н). При давлении 12 кГ (117,72 н) класс шероховатости полированной поверхности получается низкий (8б—8в). Кроме того, не выводятся следы шлифования. С увеличением давления класс шероховатости возрастает. Наилучшие результаты по шероховатости достигаются при давлении на полировальник, равном 35—45 кГ (343,35—441,25 н).

При низком давлении пластические деформации образуются только при срезании вершин гребешков, а затем процесс замедляется, так как поверхность резания увеличивается и удельные давления становятся недостаточными для образования пластических деформаций. Явления выглаживания поверхности ослабевают, и шероховатость возрастает.

Микротвердость поверхности с увеличением давления возрастает. При давлении 12 кГ (117,72 н) она равна 831 кГ/мм² (8172,11 Мн/мм²), а при 42 кГ (412,02 н) — 937 кГ/мм² (9191,97 Мн/мм²). Это объясняется тем, что с повышением давления увеличиваются и пластические деформации, возрастает наклеп тончайших слоев полируемой поверхности.

В связи с исследованием закономерности изменения качества поверхности в зависимости от давления на полировальник можно высказать некоторые соображения о характере воздействия оксидных пленок на процесс полирования в пределах одного рабочего цикла, а также в различных диапазонах величин контактного удельного давления. Оксидные пленки, безусловно, образуются непрерывно, но их влияние на съем металла в начале и конце рабочего цикла неодинаково. В первый период, когда работают еще нераздробленные крупные зерна, имеет место режим обычного шлифования. В это время пленки в процессе стружкообразования играют меньшую роль. По мере перехода от резания к выглаживанию, когда в работе участвуют только сильно раздробленные зерна, роль оксидных пленок в стружкообразовании резко повышается. Другими словами, усиливается влияние процессов и явлений адсорбции.

Нами установлено, что влияние оксидных пленок различно не только в рамках одного рабочего цикла, но и в разных диапазонах давления на полировальник. Проведенные эксперименты подтверждают, что с повышением давления съем металла увеличивается. Затем в какой-то момент наступает перегиб кривой с последующим уменьшением съема (рис. 75).

При полировании в первом случае на деталь подавалось чистое веретенное масло, а во втором — масло с 2% олеиновой кислоты (установлено, что такое содержание кислоты является оптимальным и соответствует максимальной интенсификации процесса съема металла).

Из рис. 75 видно, что в случае применения кислоты съем металла повышается. В обоих случаях перегиб кривых наступает в зоне давления примерно $18\text{--}20 \text{ кг/см}^2$ ($176,58\text{--}196,2 \text{ н/см}^2$). Затем для случая работы только с веретенным маслом съем резко снижается. При добавке 2% олеиновой кислоты падение съема идет очень медленно. Следовательно, в области повышенных давлений на полировальник олеиновая кислота приобретает особое значение. Это можно объяснить тем, что в этой области дробление зерен происходит интенсивнее, а, как извест-

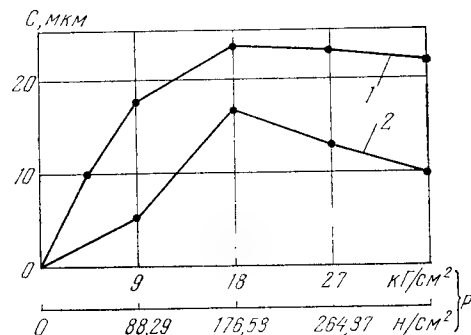


Рис. 75. Эффективность действия олеиновой кислоты при различных удельных давлениях на полировальник (съем металла C , $\mu\text{м}$ на диаметр, давление на полировальник P , кг/см^2 (н/см^2)): 1 — с олеиновой кислотой; 2 — без кислоты

но, мелкие фракции зерен сильнее адсорбируются пленками и активнее удаляется металл.

Полирование шкуркой различной зернистости. В практике полирования чистая поверхность получается при работе мелкозернистой шкуркой. Но все же грубые поверхности (порядка 7-го класса) рекомендуется полировать двумя шкурками: первая зернистостью, например, 150 для предварительного полирования и вторая зернистостью 220 для чистового. Нужно учесть, что на мелкозернистой шкурке паста удерживается хуже. При работе крупнозернистой шкуркой большее удельное значение приобретает процесс резания, а при мелкозернистой — процесс пластического течения металла.

Полирование вручную (на обычном полировальном шпинделе). Проведенными многочисленными экспериментами по полированию колец на обычных полировальных станках (вручную) установлено, что невозможно получать устойчиво шероховатость поверхности 10-го класса (после 7—8-го классов) при скорости вращения детали, меньшей $10\text{--}12 \text{ м/сек}$. В результате небольших давлений на полировальник — порядка $20\text{--}25 \text{ кг}$ ($196,2\text{--}245,25 \text{ н}$), как отмечалось, резание и пластическое деформирование гребешков в этих условиях протекают только в начальный момент. Для улучшения резания нужно увеличить скорость вращения детали до $18\text{--}20 \text{ м/сек}$. При этом даже при малых удельных давлениях могут протекать пластические деформации и удаление металла резанием [90].

Из изложенного выше экспериментального материала по автоматической и ручной полировке четко вырисовывается однозначность следующих двух вариантов:

1) повышение удельного давления на полируемую поверхность при пониженной скорости вращения детали;

2) повышение скорости вращения детали при пониженном давлении на полируемую поверхность.

Следует отметить еще одну общую тенденцию, заключающуюся в том, что если применяется ручная полировка, то нужно пользоваться по возможности более крупнозернистой абразивной составляющей (крупное зерно на шкурке или пасте). Тогда процесс будет ближе подходить к процессу «резания», а не «трения». Технологические закономерности, установленные для автоматического полирования, полностью относятся и к ручному полированию. Учитывая более высокую производительность автоматического полирования, безусловно, нужно его рекомендовать для широкого внедрения в производство. В настоящее время на ГПЗ-11 этот процесс полностью автоматизирован.

Для повышения производительности на полировальных автоматах применяются два полировальных суппорта: задний — для предварительного полирования шкуркой зернистостью 150 и передний — для чистого полирования шкуркой 220.

Полирование двумя полировальниками. Предыдущий экспериментальный материал был получен нами при исследовании полирования в одну операцию, т. е. при работе одним полировальником и шкуркой одной зернистости. Это позволило в некоторой степени вскрыть технологические закономерности и физическую природу самого процесса полирования.

Установлено, что с точки зрения снижения шероховатости поверхности сочетание двух операций, проводимых с различной зернистостью полирующей шкурки, дает положительные результаты. Такое сочетание осуществляется, например, на полировальном автомате ПАВ-1 работой двумя полировальниками.

В практике существует мнение, что для получения менее шероховатой полированной поверхности нужно применять более мелкозернистую шкурку. Но это мнение не всегда правильно. Установлено, что абразивные зерна, закрепленные на тканевой основе в любом нормальном сечении, проходящем через зону контакта с деталью, образуют режущий контур, который копируется на полируемую поверхность. Очертания этого контура в значительной степени выпрямляются (нивелируются) в результате заполнения межзерновых промежутков свободными абразивными зернами, находящимися в пасте.

Вполне понятно, что мелкозернистые шкурки образуют как бы «мелкозубые» режущие контуры, а крупнозернистые — «крупнозубые». Микрорельеф шлифованной поверхности приходит в контакт с «мелкозубым» режущим контуром по большему числу точек, чем в случае «крупнозубого» режущего контура. Поэтому в первом случае удельные давления в точках контакта резко снижаются, процесс протекает с преобладанием работы трения и с соответствующим уменьшением работы резания. Через $1\text{--}2 \text{ сек}$ работы контактных точек становится так много, что резание почти прекращается. Исходная шероховатость в данном случае остается несрезанной.

Интенсивный съем металла происходит в том случае, если поддерживается необходимое соотношение между процессами резания и пластического выглаживания поверхности. Затухание резания приводит к затуханию процесса в целом. Нельзя допускать, чтобы шероховатый микропрофиль заглаживался частично, т. е. по вершинам выступов. Следовательно, исходная шероховатость должна непрерывно уменьшаться. В конце процесса резание резко затухает и усиливается пластическое выглаживание. Этот момент аналогичен выхаживанию в случае шлифования, когда дальнейшее углубление зерен в металл почти прекращается.

Непрерывное и равномерное уменьшение исходной высоты шероховатостей может быть в том случае, если режущий контур абразивной шкурки будет непрерывно изменяться в направлении от «крупнозубого» к «мелкозубому». Для удовлетворения этого условия нужно было бы применять последовательно две-три абразивные шкурки с соответственно уменьшающимися размерами зерен. Но такой метод привел бы к недопустимо большому времени полирования, поэтому обычно применяют две шкурки: одну крупнозернистую, а вторую мелкозернистую.

В целях более плавного и равномерного изменения режущего контура от грубого к чистовому желателен цикл работы двух полировальников построить так, чтобы сначала полировала только крупнозернистая шкурка. Мелкозернистая вступает в работу с таким расчетом, чтобы некоторое время обе шкурки полировали одновременно. Затем предварительный полировальник отводится и продолжает работу доводочный (полировальники расположены с диаметрально противоположных сторон).

Одновременная работа двумя шкурками соответствует переходному периоду от черногого цикла к чистовому. При равномерном изменении величины неровностей режущего контура в течение всего времени полирования поддерживается более или менее постоянное соотношение между процессами резания и пластического сглаживания (размазывания) материала поверхностного слоя. Это необходимое условие, при котором наивыгоднейшим образом сочетаются высокая производительность процесса и получение наименьшей шероховатости полированной поверхности.

Для повышения режущей способности абразивной шкурки и более ровного пластического выглаживания полируемой поверхности полировальникам сообщают осциллирующие движения. При полировании желобов колец шарикоподшипников полировальники имеют качательные движения. При этом абразивные зерна режут большим числом граней и следы резания каждым зерном не повторяются, что имеет существенное значение для получения чистых поверхностей. Аналогично суперфинишированию и хонингованию здесь также имеется оптимальное соотношение между скоростью вращения детали и числом двойных качаний полировальников в 1 мин.

Как известно, производительность процесса и качество полированной поверхности в значительной степени зависят от удельного давления в месте контакта полировальной шкурки с деталью. Эта зависимость осо-

бенно заметно проявляется при работе в два полировальника, так как сильнее сказываются тепловые явления, главным образом в период одновременной работы двух шкур. В этот период температура тончайшего поверхностного слоя детали резко возрастает.

С увеличением удельного давления шероховатость полированной поверхности улучшается. По мере уменьшения шероховатости контактная поверхность с абразивными зернами значительно увеличивается; сами же зерна к концу цикла сильно измельчаются. Для продолжения процесса резания в таких условиях, конечно, требуется повышенное контактное давление. Тем не менее в каждом конкретном случае существует максимум удельного давления, превышение которого приводит к ухудшению полированной поверхности. Это объясняется тем, что в результате все возрастающей силы трения образуется большее количество теплоты и на полированной поверхности металл как бы наволакивается в виде отдельных сгустков. Кроме того, имеет место усиленное схватывание зерен с размягченным металлом, в результате чего создаются надиры поверхности.

Наши теоретические соображения о физической сущности процесса полирования двумя абразивными шкурками хорошо согласуются с экспериментальными данными [90].

В основу экспериментов был положен цикл полирования, предложенный ЭНИИПП. Полировались желоба внутренних колец шарикоподшипников № 306 (сталь ШХ15, закаленная до HRC 62). Работа проводилась на автомате ПАВ-1. Рекомендуемые режимы: скорость детали 6—7 м/сек; удельное давление в месте контакта 15—20 кг/см² (147,15—196,2 н/см²); число двойных качаний полировальников в 1 мин 350—500; угол качания полировальников 14—20° (0,245—0,35 рад); шлифполотно на предварительном полировальнике зернистостью 120, на доводочном 240. В качестве поверхностно-активной жидкости применялось веретенное масло с добавлением 2% олеиновой кислоты. Длительность контакта шлифполотна с деталью на предварительном и доводочном полировальниках 3 сек.

Полирование велось по следующему циклу: включался в работу предварительный полировальник. Через 2 сек после начала работы предварительного полировальника начинал работать доводочный. Таким образом, в течение 1 сек одновременно работали оба полировальника.

В проводимых экспериментах определялись наивыгоднейшие режимы полирования, подбирались наилучшие характеристики шлифполотна и оптимальная исходная шероховатость, обеспечивающие стабильное получение микронеровностей 11-го класса.

Для определения влияния того или иного технологического фактора на шероховатость поверхности каждый раз полировалось 50 деталей. Исходная шероховатость шлифованных поверхностей соответствовала 7б—7в классу. Давление полировальника принималось равным 15, 20, 30 и 40 кг (147,15; 196,2; 294,3 и 392,4 н). Измерялось оно динамометром. Площадь контакта шлифполотна с деталью равнялась примерно 2 см².

В первом цикле опытов на предварительном полировальнике применялось шлифполотно зернистостью 150, на доводочном — 280. Шлифполотно намазывалось пастой следующего состава: абразивного порошка М14—68,5%; стеарина—19; вазелина—10,5; керосина—2%. Во втором цикле опытов на предварительном полировальнике шлифполотно было зернистостью 120, на доводочном—240. Оно смачивалось веретенным маслом с добавкой 2% олеиновой кислоты (по методу ЭНИИПП). В обоих циклах опытов снимался припуск 0,012—0,018 мм. Число двой-

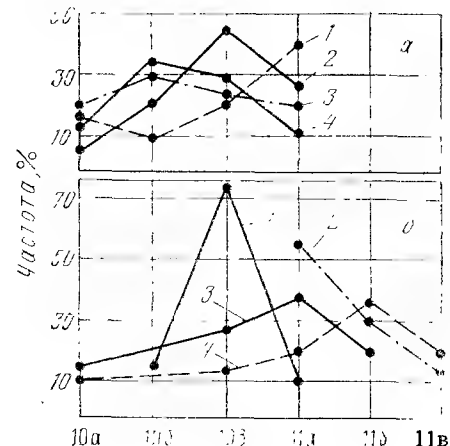


Рис. 76. Зависимость шероховатости полированной поверхности от величины давления на полировальник: а — на предварительном полировальнике шлифполотно зернистостью 120, на доводочном 240 с применением веретенного масла с 2% олеиновой кислоты (1 — $P=20$ кГ; 2 — 40; 3 — 30; 4 — 15 кГ); б — зернистость соответственно 150 и 280 с пастой М14 (1 — $P=40$ кГ; 2 — 30; 3 — 15; 4 — 20 кГ)

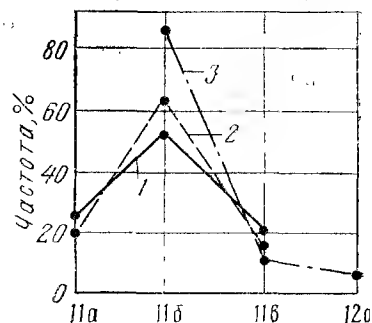


Рис. 77. График зависимости шероховатости полированной поверхности от исходной шероховатости шлифованной поверхности. Давление на полировальник $P=30$ кГ (294,3 н). Шлифполотно 150 и 280 с пастой М14: 1 — исходная шероховатость 6в класса; 2 — 7б; 3 — 8б класса

ных качаний полировальников в 1 мин было принято равным 280, угол качания 12° (0,21 рад). Результаты экспериментов приведены на рис. 76.

Из анализа результатов опытов видно, что меньшая шероховатость поверхности после полирования получается в случае работы по второму варианту, т. е. при применении шлифполотна зернистостью 150 и 280, а также пасты М14 и при давлении на полировальник, равном 30 кГ (294,3 н). В этих условиях устойчиво обеспечивается шероховатость 11б класса. При давлении 40 кГ (392,4 н) шероховатость поверхности возрастала.

Для установления влияния исходной шероховатости на шероховатость после полирования были отполированы три партии колец по 50 шт., причем в первой партии исходная шероховатость соответствовала 6в классу, во второй — 7б и в третьей — 8б. Опыты (рис. 77) прово-

дились при давлении на полировальник 30 кГ (294,3 н). Шлифполотно зернистостью 150 и 280 намазывалось пастой М14. Из рисунка видно, что меньшая шероховатость полированной поверхности получается при исходной шероховатости, соответствующей классу 8б.

На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод, что в случае работы двумя полировальниками для устойчивого получения шероховатости поверхности 11-го класса нужно обеспечить следующие условия: 1) скорость полирования 6 м/сек; 2) давление на полировальник 30 кГ (294,3 н) при площади контакта с деталью, равной примерно 2 см²; 3) на предварительном полировальнике шлифполотно зернистостью 150, а на доводочном 280; 4) шлифполотно покрывается пастой, как и в прежних опытах; 5) число двойных качаний полировальника в 1 мин 250—350; 6) угол качания полировальников 10—15° (0,175—0,2625 рад); 7) продолжительность качания полировальников с деталью 5 сек, причем предварительный и доводочный полировальники работают 3 сек; одновременно работают оба полировальника в течение 1 сек; 8) исходная шероховатость должна быть примерно класса 8б.

Проведенные исследования показывают, что можно принять иной порядок включения полировальника. В первый период одновременно могут работать крупнозернистая и мелкозернистая шкурки. Затем крупнозернистая шкурка отключается и продолжает работать только мелкозернистая. Качество полированной поверхности при этом же времени получается таким же, как и в первом варианте. Можно работать и по варианту с последовательным включением шкурок.

При построении того или иного цикла работы требуется обеспечить постепенный, автоматически протекающий переход от процесса резания к процессу выглаживания. О правильности построения цикла можно судить по качеству полированной поверхности и съему металла за равный период времени. Для правильной ориентировки при построении рабочего цикла нужно знать физическую сторону процесса стружкообразования и формирования поверхности в периоды одновременной и расчлененной работы абразивных шкурок.

Для исследования этого вопроса рассмотрим, например, вариант цикла, когда вначале работают одновременно две шкурки, а затем остается только одна мелкозернистая. Здесь в начальный период происходит интенсивное резание. Режущий контур черновой шкурки копируется на обрабатываемую поверхность, образуя большую шероховатость. У чистовой шкурки режущий контур мельче, поэтому происходит активный процесс срезания гребешков грубого микрорельефа, образующегося от черновой шкурки (в этот период срезается примерно 75% высоты гребешков).

Вполне понятно, что как у черновой, так и у чистовой шкурки происходит непрерывный процесс дробления и размельчения зерен, поэтому оба режущих контура стремятся к более тонким или «мелкозубым» контурам. Но важно то обстоятельство, что при данном цикле работы черновая шкурка всегда врезается в менее шероховатую поверхность, а чистовая — в более шероховатую. Это вполне понятно, так как черновая шкур-

ка режет после чистовой, а чистовая — после черновой. Последнее благоприятно отражается на режущей способности шкурок, так как постоянное несоответствие режущих контуров шкурок и микрорельефа обрабатываемой поверхности приводит к эффекту шарошения и противодействию засаливанию. Интенсивность съема металла повышается. После отключения черновой шкурки происходит заглаживание поверхности за счет поверхностных пластических деформаций, химических реакций и явлений адсорбции.

В любом рабочем цикле полирования происходит непрерывное изменение соотношения между процессами резания, пластических деформаций и химических реакций.

В структуре цикла, где основное время падает на отдельную работу шкурок, механизм образования поверхности с геометрической точки зрения будет несколько иным. В данном случае режущий контур шкурки и микропрофиль обрабатываемой поверхности в любой момент резания по геометрической форме очень близки друг к другу, т. е. по своему характеру они всегда приблизительно одного порядка. При таком близком совпадении рельефов создаются условия для их взаимной приработки, в результате чего режущая способность шкурки уменьшается, увеличиваются доля контактного трения и вероятность засаливания. Эти явления наблюдаются даже при наличии осциллирующих движений полировальников. Скорость вращения детали во много раз больше скорости осциллирующего движения (скорость вращения детали составляет примерно 600—700 м/мин, а скорость осциллирующего движения — 4—5 м/мин. Бокового срезания гребешков, расположенных на одной образующей обрабатываемой детали, произойти не может. Резание происходит в направлении спирали, имеющей ничтожно малую величину угла подъема.

Вариант отдельной и последовательной работы шкурок приводит к большему удельному весу пластических деформаций поверхностного слоя, а съем металла несколько уменьшается. Поэтому при подобных схемах рабочего цикла можно применять более крупнозернистые шкурки, наиболее легко расщепляемые абразивные зерна, например электрокорундовые, и несколько повышенное давление на полировальник.

Вариант, при котором совместная работа обеих шкурок наблюдается в середине цикла, является как бы промежуточным. За счет эффекта шарошения при одновременной работе происходит некоторое восстановление режущей способности шкурки, которая к половине цикла успевает несколько засалиться. В целом режущая способность обеих шкурок используется полнее.

По нашему мнению, физико-механические свойства полированной поверхности определяются в основном в период заглаживания (заметим, что здесь речь идет о физико-механических свойствах, сообщаемых поверхности собственно на операции полирования).

Удельный вес пластических деформаций и химических процессов в период окончательного формирования поверхности будет во многом зависеть от степени размельчения зерен, их притупления и засаливания шкурки. От этого в целом будут зависеть микроструктура тончайшего

поверхностного слоя, его микротвердость, напряженное состояние и усталостная прочность.

Съем же металла в значительной степени зависит от структуры рабочего цикла. Чем большую долю общего времени шкурки работают совместно, тем больше съем металла. Рабочий цикл должен быть рассчитан на более полное использование режущей способности обеих шкурок.

Высказанные соображения были проверены экспериментально [90]. В прежних условиях проводилось полирование колец шарикоподшип-

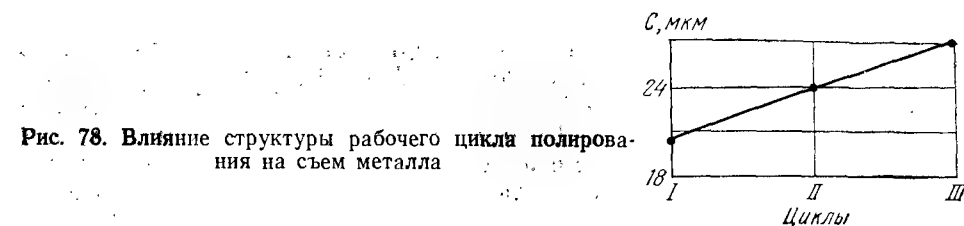


Рис. 78. Влияние структуры рабочего цикла полирования на съем металла

ников, но при различной структуре рабочего цикла. Время цикла во всех случаях было одинаковым и равнялось 7 сек (такое время выбрано для гарантированного вывода шлифовочных рисок). Во всех опытах измерялся слой снятого металла.

Варианты циклов:

I) черновая шкурка работает 4 сек, а затем последовательно включается чистовая, которая работает 3 сек;

II) черновая шкурка работает 5 сек, через 3 сек после начала процесса включается в работу чистовая, так что в течение 2 сек в середине цикла обе шкурки работают одновременно;

III) в начале цикла обе шкурки работают одновременно в течение 4 сек, затем черновая отключается, а чистовая продолжает работать до конца цикла.

При каждом варианте полировалось по 10 колец, замерялся съем металла на диаметр в микрометрах и подсчитывались среднеарифметические значения.

Результаты исследования приведены на рис. 78. Шероховатость везде соответствовала 10в—11а классам. Высказанные теоретические положения хорошо согласуются с экспериментами.

Полирование с помощью фетра (или войлока). Этот метод полирования имеет некоторые особенности по сравнению с полированием абразивной шкуркой. Прежде всего следует отметить эластичность и гибкость инструмента. Здесь больше преобладают явления «трения», а не «резания».

При полировании фетром даже более крупная абразивная фракция обеспечивает меньшую шероховатость поверхности. Каждое зерно при резании-царапании может быть прижато к полируемой поверхности только упругостью фетра или войлока, поэтому нельзя представить, что какое-то зерно может прорезать глубокую царапину, как этого можно

было бы ожидать при жестком закреплении зерен. С возрастанием силы прижима фетра к детали увеличения глубины царапин почти не происходит, так как зерна утопятся в массу фетра и последний сильнее будет давить на полируемую поверхность, что вызовет увеличение трения и выглаживающего эффекта. Следовательно, создаются благоприятные условия для поддержания постоянства глубины царапин и обеспечения гладкой поверхности.

Эксперименты по полированию шлифованных колец роликоподшипников были проведены при скорости вращения детали $V=8$ м/сек. Состав пасты: абразивный порошок М14 — 68,5%, стеарин — 19, вазелин — 10,5, керосин — 2%.

Шероховатость шлифованных колец соответствовала 86 классу. При изменении давления в пределах 20—35 кг (196,2—343,35 н), а также времени полирования от 2 до 7 сек во всех случаях обеспечивалась шероховатость поверхности 10—11-го классов. С увеличением давления или времени полирования отмечалось небольшое уменьшение шероховатости (шероховатость переходила в следующий разряд, например из 10а в 10б).

Итак, можно считать, что при полировании шлифованных поверхностей при скорости вращения детали порядка 10 м/сек с применением фетра или войлока, намазанного пастой типа ГОИ, возможно изменение шероховатости с 86 до 10-го класса. Варьирование величинами давления и времени полирования может привести к незначительному (на 1—2 разряда) изменению шероховатости. Эти выводы хорошо согласуются с указанными выше особенностями физической стороны процесса полирования фетром.

8. Сравнительные исследования процессов шлифования, полирования и доводки по физико-механическим свойствам обработанных поверхностей и по усталостной прочности

Долговечность подшипников часто определяется усталостной прочностью поверхностей шаров. По сравнению с обработкой рабочих поверхностей колец шары после закалки подвергаются более тонким операциям обработки.

В настоящее время более распространенной последовательностью обработки шаров после закалки является шлифование (между чугуном и мелкозернистым абразивным кругом); доводка между двумя чугунными дисками с применением пасты; полировка во вращающихся наклонных барабанах с венской известью и полировка в деревянных барабанах с хромовой кожей.

При шлифовании закаленные шары катятся по концентрическим канавкам, прорезанным на торце неподвижного чугунного диска, к которому они прижимаются торцом вращающегося мелкозернистого абразивного круга. Шары, пройдя окружность своей канавки, направляются

в элеватор, где происходит их перемешивание, затем снова попадают в рабочую зону между диском и абразивным кругом. При этом они не попадают в прежнюю канавку, а как-то беспорядочно распределяются по другим, что способствует получению однородности шаров данной партии.

Шары, находящиеся в канавках чугунного диска, катятся по нему вследствие прижима торцов вращающегося абразивного круга. Кинематически это подобно работе большого упорного подшипника. Следовательно, шары обрабатываются шлифовальным кругом главным образом за счет обкатки, при которой абразивные зерна в месте контакта вырывают металл с поверхности шара. Правда, в связи с тем что контактная площадка имеет сферическую поверхность, при перекачивании неизбежно проскальзывание в местах контакта. Наличие небольшого проскальзывания усиливает срезание металла с обрабатываемой поверхности. Шар при перекачивании совершает вращение относительно двух взаимно перпендикулярных осей, в результате чего следы царапин, наносимых абразивными зернами, располагаются беспорядочно. Неповторяемость траектории движения режущих зерен является необходимым условием производительной и качественной обработки. Несмотря на относительно большие окружные скорости вращения абразивного круга (3—5 м/сек), фактическая скорость резания-царапания поверхности шара небольшая, поэтому температура в зоне резания здесь значительно ниже, чем при обычном шлифовании (об этом говорит отсутствие искр при резании). Из изложенного следует, что процесс шлифования шаров можно отнести к категории доводочных процессов.

Вопросы формообразования при шлифовании закаленных шаров между чугунным диском и абразивным кругом имеют весьма актуальное значение, так как они во многом являются общими для всех отделочных процессов.

Нами исследовалась обработка закаленных шаров размером $3/4$ дюйма на шлифовальных станках МШ-33. Шлифовальный круг имел объемный вес в пределах 2,58—2,6, зернистость 230, связку керамическую [90].

Химический состав чугуна следующий: Собщий—3,24—3,7%; Сграфит—2,65; Mn—0,47—0,57; Si—1,9; S—0,18—0,2; Cr—0,4—0,5%; твердость по Бринеллю 190—230; диаметр шлифовального круга 800 мм. Число оборотов его в первом цикле опытов $n=63$ об/мин (6,615 рад/сек), во втором $n=82$ об/мин (8,61 рад/сек); охлаждающая жидкость — дизельное топливо; снимаемый припуск на диаметр 0,38 мм. Шероховатость поверхности шаров до шлифования соответствовала 6-му классу. Основная масса шаров имела исходную гранность и овальность в пределах 12—20 мкм. Давление на обрабатываемые шары осуществлялось через гидравлическую систему.

Для выяснения лучшей величины давления в различные периоды шлифования были проведены специальные опыты. Шлифовалась партия шаров и через каждые 1 час 30 мин повышалось давление на 2 кг/см² (19,62 н/см²). За каждый полуторачасовой период подсчитывалась средняя величина овальности и гранности (из 100 шаров). Кро-

ме того, на каждой ступени измерялся съем металла. Результаты исследования представлены на рис. 79, а, б.

Из анализа полученных кривых видно, что с повышением числа оборотов шлифовального круга овальность и особенно гранность уменьшаются, а съем металла увеличивается. Поскольку процесс протекает с большой долей обкаточного движения (с небольшим проскальзыванием), то существенное значение имеет скорость вращения шаров относительно собственных осей. Чем быстрее шар вращается, тем большее

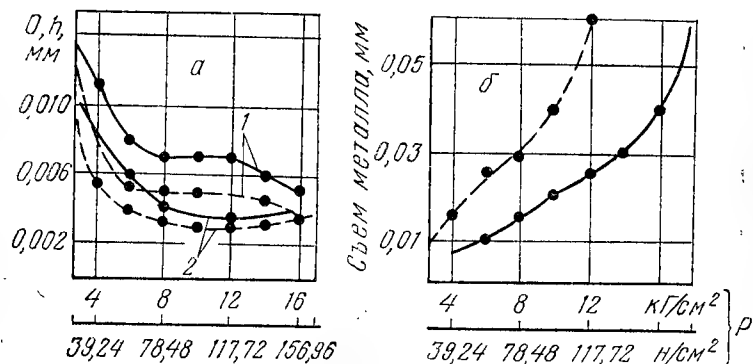


Рис. 79. Зависимость: а — гранности h (1) и овальности O (2); б — величины съема металла от давления (P) при шлифовании закаленных шаров. Сплошные линии — при 63 об/мин (6,615 рад/сек) шлифовального круга; штриховые — при 82 об/мин (8,61 рад/сек)

число раз его элементарные поверхности придут в контакт со шлифовальным кругом, следовательно, произойдет большее число выколов, срезов, царапин, притом в разных направлениях (последнее обстоятельство очень существенно). Этим можно объяснить увеличенный съем металла и более быстрое скругление исходной формы. Но, как показала практика, повышение числа оборотов круга выше 100 об/мин (10,5 рад/сек) приводит к неспокойному поведению шаров (большим вибрациям), и в этой зоне точностные факторы ухудшаются. Легко заметить, что в диапазоне давлений примерно до 5 кг/см² (49,05 н/см²) в первый период шлифования гранность и овальность резко уменьшаются. Дальнейшее повышение давления до 12—14 кг/см² (117,72—137,34 н/см²) на точность формы не оказывает влияния, а съем металла в этом диапазоне увеличивается почти пропорционально росту давления.

На основе замеченной закономерности в целях подбора наивыгоднейшего сочетания производительности и точности шлифования для производственных условий принят следующий режим давления.

В течение первых 1,5 час обработки давление поддерживают в пределах 2—5 кг/см² (19,62—49,05 н/см²), затем сразу увеличивают до 10—12 кг/см² (98,1—117,72 н/см²) и так шлифуют в течение 9—10 час, т. е. до момента достижения необходимого размера. После этого дав-

ление снижают до 5—2 кг/см² (49,05—19,62 н/см²), получая при этом заданную овальность и гранность. Общее время обработки может достигать 13—14 час. Следовательно, основной съем металла обеспечивается при максимальном давлении, а точностные факторы — при минимальном. Первый диапазон минимального давления необходим для приработки. Здесь срезается металл только с выступающих участков, что и способствует быстрому скруглению. Уточнение формы (отношение исходной погрешности к той же погрешности в конце этого периода) выражается величиной 2—3. Минимальное давление в конце обработки и уменьшение съема металла можно уподобить периоду выхаживания при обычном круглом шлифовании.

Как известно, процесс обработки во многом зависит от скорости вращения шаров относительно собственных осей. Вполне понятно, что окружная скорость шлифовального круга возрастает с увеличением расстояния от оси вращения. Следовательно, на периферийных канавках шары вращаются быстрее, что повышает их точность по сравнению с шарами, катящимися по канавкам, расположенным ближе к оси вращения шлифовального круга. В случае, когда обработка была бы закончена сразу, разница в условиях шлифования на различных канавках сильнее повлияла бы на увеличение разноразмерности и разброса значений овальности и гранности шаров в одной партии. Окончание обработки при уменьшенном давлении ослабляет отрицательное действие различных условий резания, и партия получается более точной по геометрической форме и с меньшим разбросом размеров. Шероховатость поверхности обеспечивается 8—9-го классов.

По установившейся технологии шары в дальнейшем направляются для обработки с пастой на чугунных дисках (доводка). Кинематическая доводка аналогична шлифованию, только здесь режут не закрепленные зерна, а свободные (находящиеся в пасте). При рассмотрении последовательных методов обработки шаров (шлифование, доводка, обработка во вращающихся барабанах с венской известью и затем полировка хромовой кожей во вращающихся деревянных барабанах), установлено, что в каждой последующей операции все меньшее значение имеет резание и соответственно большее приобретают химические процессы, т. е. разрушающие силы механического воздействия на металлическую поверхность убывают и возрастает роль химического воздействия. Это значит, что на каждой последующей операции обработанная поверхность становится более цельной, уменьшается количество микротрещинок, задиров, надрывов, сдвигов кристаллической решетки. В результате этого возрастают сопротивление износу и усталостная прочность. Соответственно технологической последовательности обработки уменьшается снимаемый припуск; на операции шлифования на 0,38 мм, доводки на 0,015—0,020 мм, обработки с венской известью на 0,005 мм, на операции полировки кожей почти нет съема.

В направлении от более грубых операций к более тонким (финишным), несмотря на все уменьшающийся съем металла, толщина наклепанного слоя, а следовательно, и величина сжимающих напряжений возрастает. В элеваторах или в оболточных барабанах, применяемых

Сравнительные экспериментальные данные

Работа	Микротвердость, кг/мм^2 (Мн/мм^2)		Повышение микротвердости	Разрушающая нагрузка, кг (н)		Повышение разрушающей нагрузки	Класс шероховатости поверхности, мкм	
	до доводки	после доводки		до доводки	после доводки		до доводки	после доводки
Без элеватора	762 (7475,22)	791 (7759,71)	29 (284,49)	38000 (372780)	41000 (402210)	3000 (29430)	66 (2,2)	10a (0,2)
С элеватором	765 (7504,65)	827 (8112,87)	62 (608,22)	37000 (362970)	44000 (431640)	7000 (68670)	66 (2,2)	10a (0,2)

на всех указанных операциях, совершаются массовые удары шаров друг о друга и о металлические стенки, что и приводит к упрочнению поверхности шаров. Упрочнение «здоровых», неразрушенных поверхностей значительно повышает эксплуатационные свойства; последнее влияет и на механическую прочность шаров. Это можно объяснить следующим. Вполне понятно, что даже при обработке с преобладающими химическими процессами все же на поверхности имеются отдельные риски и некоторые дефекты. При приложении внешних сил они становятся концентраторами напряжений, которые являются местом начального разрушения. Поверхностный наклеп устраняет, как бы «рассасывает» всякие концентрации напряжений и тем самым увеличивает сопротивление разрушению. Приведенные взгляды на процесс финишных операций хорошо согласуются с экспериментами [90]. Исследовалась партия шаров размером 1 дюйм. После закалки, минуя шлифование, они направлялись на доводку. Исходная твердость их была одинаковой ($\text{HRC } 62$). Доводку проводили на вертикально-доводочном станке 3 ГПЗ, причем было полностью исключено упрочнение поверхности шаров, так как элеватор отсутствовал и шары обкатывались только между чугунными дисками с пастой. Замерялись шероховатость поверхности, микротвердость и механическая прочность шаров. Затем такая же партия при равных исходных условиях доводилась, но с применением элеватора, где шары получали наклеп, и сравнивались результаты обоих экспериментов.

Такой постановкой опытов количественно было оценено значение наклепа и в то же время проверена возможность замены операции шлифования предварительной доводкой как более производительной благодаря применению поверхностно-активных паст и обеспечивающей лучшие эксплуатационные качества обработанной поверхности.

На чугунных дисках было нарезано шесть кольцевых дорожек. Диаметр дисков 650 мм; диск совершал 100 об/мин ($10,5 \text{ рад/сек}$). Состав доводочной пасты: машинного масла — 5 кг; стеарина — 1; парафина — 0,7; окиси хрома — 0,2; микропорошка М14 — 0,3 кг.

В обоих экспериментах снимаемый припуск был 200 мкм (с расчетом удаления обезуглероженного слоя) (табл. 52). Каждая цифра та-

блицы является средним арифметическим из пяти значений, полученных при замере различных шаров. Микротвердость измерялась при нагрузке на алмазную пирамиду 20 Г ($1962 \cdot 10^{-4} \text{ н}$). Из приведенных данных видно, что при работе с элеватором создается поверхностный наклеп, который характеризуется повышением микротвердости. Последнее благоприятно действует на рост механической прочности шаров (разрушающая нагрузка увеличивается). В данных условиях шероховатость поверхности от наклепа почти не зависит.

Таблица 53

Результаты экспериментов

Операция	Микротвердость, кг/мм^2 (Мн/мм^2)	Разрушающая нагрузка, кг (н)	Класс шероховатости поверхности, мкм
Полировка в барабанах известью	897 (8799,57)	46000 (451260)	10a (0,17)
Полировка кожей	902 (8848,62)	47500 (465975)	10б (0,14)

Для получения лучших эксплуатационных свойств поверхностного слоя, на наш взгляд, целесообразно заменить шлифование каленых шаров операцией предварительной доводки. Эту операцию нужно проводить с более крупным абразивным зерном в пасте и с применением элеватора. После предварительной следует чистовая доводка, при этом процесс удаления металла совмещается с упрочняющим процессом.

Аналогичному исследованию подвергались и последующие финишные операции. Указанная партия шаров после доводки (с применением элеватора) полировалась во вращающихся барабанах, число оборотов барабана $n=50 \text{ об/мин}$ ($5,25 \text{ рад/сек}$); угол наклона 45° ($0,7875 \text{ рад}$). Состав полирующей массы (для шаров общим весом 200 кг): венской извести — 6—8 кг; кальцинированной соды — 6 кг; воды — 25—30 л; длительность обработки примерно 24 час; снимаемый припуск 0,005 мм.

Полировка кожей осуществлялась в дубовых, горизонтально расположенных вращающихся барабанах. Число оборотов барабана $n=60 \text{ об/мин}$ ($6,3 \text{ рад/сек}$). На 40 кг шаров загружалось примерно 1 кг обрезков хромовой кожи. Время обработки 2 час (табл. 53).

Из приведенных данных видно, что при полировании с венской известью, а также при полировании кожей процесс упрочнения поверхности продолжается, что характеризуется повышением микротвердости. В то же время величина съема металла значительно уменьшается. Это благоприятно сказывается на эксплуатационных качествах поверхности. Разрушающая нагрузка также возрастает.

На рис. 80, а показана поверхность каленого шара после шлифования. Заметно большое механическое разрушение поверхности. Имеются также пластические деформации (виден размазанный слой металла). Поскольку после шлифования шаров процессы обработки протекают с

преобладанием химических реакций и с уменьшением доли резания, то поверхности получаются механически менее разрушенными (меньше царапин) (рис. 80, б, в, г).

Далее проводились эксперименты, в которых основное внимание уделялось изучению характера изменения физических свойств отдельных слоев в направлении от наружной поверхности в глубь металла. Как и выше, сравнивались финишные операции.

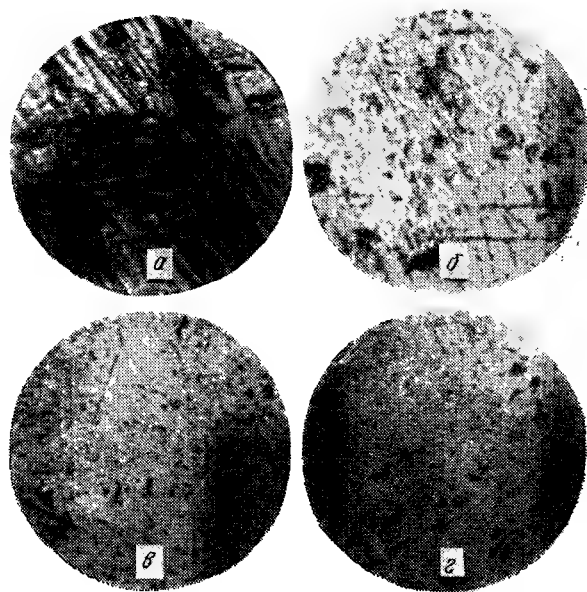


Рис. 80. Микрофотографии поверхности закаленных шаров после различных операций обработки ($\times 600$): а — после шлифования (8а класс шероховатости, $H_{\text{СК}}=0,4$ мкм); б — после доводки пастой на чугуновых дисках (10в класс, $H_{\text{СК}}=0,1$ мкм); в — после полирования в венской извести (11а класс, $H_{\text{СК}}=0,09$ мкм); г — после полирования кожей (11в класс, $H_{\text{СК}}=0,06$ мкм)

В процессе шлифования шаров после закалки в зависимости от типа шара проводился съем от 0,148 до 0,240 мм. Шлифовка осуществлялась на шарошлифовальном станке МШ-33 с давлением от 5 кг/см^2 ($49,05 \text{ н}$) вначале до 15 кг/см^2 ($147,15 \text{ н/см}^2$) в конце процесса при количестве оборотов шлифовального круга в 1 мин — от 63 до 125. В качестве охлаждающей среды применялось дизельное топливо. На операции шлифования могут возникать ожоги или отпуск поверхностного слоя.

По данным различных исследований, нагрев отдельных частей поверхности может приводить к значительному снижению твердости. Так, например, А. И. Квачева приводит данные по образованию волнистости на поверхности шариков. Величина волнистости определялась по степени искривления интерференционных полос на приборе ИЗК-14 и ИЗК-15, при этом на шарике $1/2''$ она достигала 3 мкм [90]. Волнистость связана

с неоднородной твердостью поверхности шариков вследствие отпуска в процессе шлифования, и пестрота твердости в зоне темных и светлых полос достигает нескольких единиц по Роквеллу. Автор утверждает, что этот дефект сохраняется при дальнейшей обработке, так как при полировке весь отпущенный слой полностью не может быть удален.

По нашему мнению, автор, используя в своем исследовании шары с местным падением твердости до 48—49 ед., получает не вполне характерные данные, так как таких шаров в хорошо налаженном процессе немного и вероятность попадания их на сборку также очень мала. Нами были взяты только те шары, которые имели нормальную твердость с учетом пестроты в микротвердости, обусловленной шлифованием.

После шлифования проводилась доводка закаленных шаров между чугуновыми дисками при вращении их со скоростью 60—80 об/мин ($6,3$ — $8,4 \text{ рад/с}$)

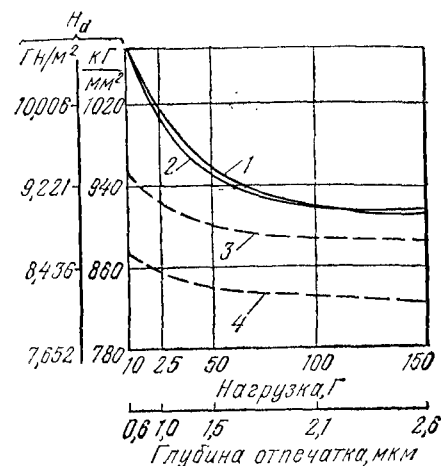


Рис. 81. Измерения микротвердости в поверхностных слоях полированных и доведенных шаров: 1, 3 — микротвердость шаров $1/2$ дюйма; 2, 4 — 1 дюйм; 1, 2 — полировка; 3, 4 — доводка

сек) и с давлением до 10 кг/см^2 ($98,1 \text{ н/см}^2$). Съем металла составил от 0,012 до 0,019 мм. Затем шары проходили полировку с венской известью в наклонных барабанах. Число оборотов наклонного барабана 35—50 в 1 мин ($3,675$ — $5,25 \text{ рад/сек}$); угол наклона барабана 45° ($0,7875 \text{ рад}$). Одновременно загружалось до 300 кг шаров. На 40 л воды брали 10—12 кг венской извести и 0,3—0,4 кг кальцинированной соды. В этих условиях получался съем металла от 0,002 до 0,008 мм, который обеспечивался за счет абразивного и химического воздействия CaO , MgO , Ca(OH)_2 , CaCO_3 . Указанный процесс одновременно со съемом металла дает поверхностный наклеп вследствие многочисленных ударов шаров друг о друга.

Для изучения изменений, происшедших в поверхностном слое шаров, также был применен метод измерения микротвердости на приборе ПМТ-3 при различных нагрузках — от 10 до 150 Г (от 0,0981 до $1,4715 \text{ н}$). Исследованию подвергались шары диаметром $1/2$ и 1 дюйм после доводки и следующей за ней операции — полировки по указанной выше технологии. Шероховатость поверхности шаров после доводки соответствовала 9в и в полированных 10в классам. Результаты опытов приведены на рис. 81, а, б (каждая точка на графике — результат 10 измерений).

Из характера кривых микротвердости для шаров $1/2$ дюйма видно, что при самых малых нагрузках на алмазную пирамиду и, следовательно

но, в самых тонких наружных слоях микротвердость имеет наиболее высокое значение: для доведенных шаров 950 ед. H_d , а для полированных 1080 ед. H_d , что приблизительно соответствует твердости HRC 66—68. С увеличением нагрузки (в более глубоких слоях) твердость заметно снижается и при нагрузке 150 Г (1,4715 н) достигает для доведенного шара 880 ед. H_d и для полированного 940 ед. H_d , что соответствует 64 и 65 ед. по Роквеллу. Указанная твердость соответствует глубине проникновения пирамиды 2,6 мкм. Твердость основной, глубинной массы шара

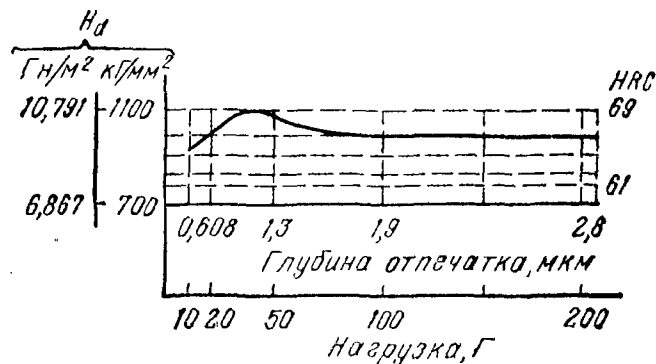


Рис. 82. Зависимость между величиной нагрузки и микротвердостью полированной поверхности закаленной стали ШХ15 (по А. С. Шейну)

HRC 62—63. Из приведенных данных видно, что поверхностный слой как у доведенных, так и у полированных шаров имеет наклеп вследствие пластической деформации при обработке, причем наиболее интенсивный отмечается в слое толщиной около 3 мкм.

Высокая твердость наблюдается на поверхности шаров после полировки, что обусловлено большим числом ударов шаров друг о друга в процессе обработки в барабанах. Аналогичная картина наблюдается и для шаров диаметром 1 дюйм, однако разница поверхностной твердости полированных и доведенных шаров здесь значительнее, чем для полдюймовых. Это объясняется более сильным наклепом при столкновении более тяжелых шаров.

А. С. Шейн исследовал микротвердость поверхностного слоя плоских образцов, обработанных доводкой на оптическом станке (процесс, аналогичный изготовлению металлографических шлифов). По его данным, кривая микротвердости имеет максимум при нагрузках 20—50 Г (0,1962—0,4905 н), что соответствует глубине проникновения пирамиды примерно 1 мкм (рис. 82). Кривые А. С. Шейна при начальных минимальных нагрузках отличны от кривых, полученных в наших опытах. Падение твердости наружного слоя у образцов Шейна объясняется отпуском этих слоев при принятом им методе обработки поверхности.

В нашем же случае, хотя, возможно, и имеются некоторый нагрев поверхности и связанные с ним структурные превращения с понижением твердости, однако этот процесс подавляется образованием интенсивного

наклепа в результате ударов (слабых в элеваторах при доводке и более сильных в барабанах при полировке). Наблюдается значительное рассеивание значений микротвердости при одной нагрузке (рис. 83).

Естественно, что при малых нагрузках относительная погрешность измерений возрастает, однако большое количество замеров, сделанных двумя исследователями, позволяет предположить, что наблюдающиеся величины и разброс твердости обусловлены наличием в действительности такой микротвердости.

Нами измерялась твердость поверхностей, обработанных различными методами, и во всех случаях среднее значение твердости их было различным и соответствовало тому или иному виду обработки [90]. Следовательно, абсолютная неточность измерения твердости при малых нагрузках значительно меньше величины изменения твердости, обусловленной различными видами обработки.

Из рис. 83 видно, что с увеличением нагрузки на пирамиду разброс твердости резко падает и после нагрузки в 50 Г (0,4905 н) стабилизируется, достигая величины 60—80 ед. H_d . Это можно объяснить проникновением пирамиды в глубинные зоны с более равномерной твердостью, где местный нагрев при шлифовке не так сказался.

В поверхностных слоях на элементарных участках происходят структурные превращения как результат тепловых явлений, сопровождающих процесс шлифования, предшествующий доводке и полировке.

Так как абразивный круг в своем объеме имеет хаотично расположенные абразивные зерна, а большинство зерен — разные по величине отрицательные передние углы, это создает различные условия резания для каждого зерна и, следовательно, разную температуру резания (если рассматривать работу абразивного зерна как работу очень маленького резца). Поэтому на микроучастках поверхности создаются условия для процессов отпуска на разную твердость, что и улавливается при замере микротвердости (как разброс, особенно при малых нагрузках).

Как известно, на границах микрообъемов с различными структурами возникают значительные напряжения, приводящие к образованию микротрещин, что снижает долговечность изделия. Поэтому главное внимание технологов должно быть направлено на создание наиболее благоприятных условий шлифования, а механическая обработка в целом должна заканчиваться финишными операциями, которые протекали бы при низких температурах резания, как например доводка и полировка. На операциях доводки и полировки в некоторой степени уменьшается неблагоприятное влияние шлифовки за счет снятия поврежденного поверхностного слоя и за счет наклепа.

Положительное влияние наклепа, выражающегося в повышении микротвердости, на долговечность проверено нами специальными экспериментами. Проводились усталостные испытания шаров после различных операций обработки. Исследования велись на машине МИ системы МЭЗИМ и В. Шары испытывались в паре со специально изготовленным цилиндрическим диском из стали ШХ15, закаленным на твердость HRC 63—65 и обработанным до шероховатости 10-го класса. Твердость диска была специально принята более высокой, чтобы обеспечить воз-

никновение первого усталостного выкрошивания на шаре. На одном шпинделе машины закрепляется диск, а на втором — шар. Последний был вклеен в сферическое гнездо специально изготовленной оправы.

Испытание на качение проводилось при нагрузке 175 кГ (1716, 75 н) с 10%-ным проскальзыванием. В место обкатки подводилось машинное масло (в виде капель). В качестве критерия оценки долговечности принято появление на испытываемой поверхности усталостного разрушения в

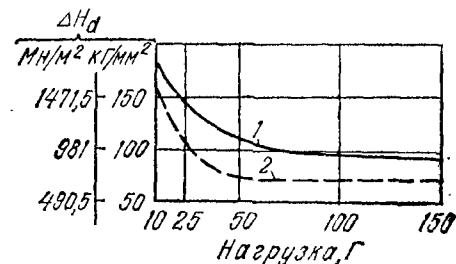


Рис. 83. График рассеивания значений микротвердости поверхностей полированных и доведенных шаров: 1 — полировка; 2 — доводка

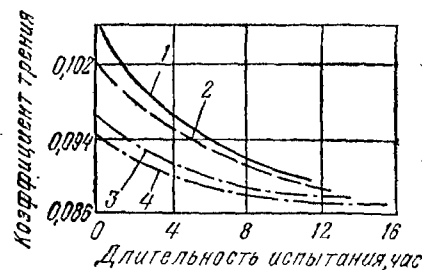


Рис. 84. Изменение коэффициента трения поверхностей с различной финишной обработкой: 1 — шлифовка; 2 — доводка пастой между чугунными дисками; 3 — полировка в венской извести; 4 — полировка в коже

виде питтингов. Нами фиксировался момент появления нескольких питтингов, видимых при 6-кратном увеличении, при этом отсчитывалось число оборотов и время до появления первых питтингов на поверхности шара. Испытания проводились при 200 об/мин (21 рад/сек) верхнего шпинделя (шарика) и 180 об/мин (18,9 рад/сек) нижнего шпинделя (диска), что соответствует окружной скорости шарика 239 мм/сек и диска 314 мм/сек.

Установлено, что при шлифовке до появления первых питтингов проходит 11 час 38 мин, доводке — 12 час 30 мин, полировке в венской извести — 13 час 50 мин, полировке кожей — 15 час 36 мин. Число оборотов до появления питтингов принималось как среднеарифметическое из пяти испытаний, проведенных при одинаковых условиях.

У доведенных шаров, полированных в извести и коже, шероховатость поверхности оказалась почти одинаковой, поэтому разницу в усталостной прочности можно объяснить различным физико-механическим состоянием тончайшего поверхностного слоя. Одним из основных факторов, характеризующих это состояние, можно назвать величину микротвердости.

Как видно из результатов опытов, наименьшую контактную прочность имеет шлифованная поверхность, а наиболее высокую — поверхность, полированная кожей. Каждая последующая операция, начиная от шлифовки, является очень тонкой, поэтому ранее образовавшиеся разрушения поверхностного слоя продолжали устраняться, а степень наклепа возрастала. Наклеп способствует устранению структурных концентраторов напряжений, так как более мягкие структурные составляю-

щие сильнее воспринимают наклеп, и микротвердость элементарных участков выравнивается. Поэтому примерно при одинаковой шероховатости повышалась контактная усталостная прочность.

Физическое состояние поверхности в какой-то степени характеризует коэффициент трения. При тех же экспериментах фиксировалось изменение его величины (рис. 84). Шары, взятые с разных операций, имеют различный исходный коэффициент трения. Чем чище поверхность, тем меньше коэффициент трения. В процессе обкатки во всех случаях коэффициент трения снижался и стремился к определенному значению. Приблизительно через 13—14 час работы его величина составляла 0,087, в дальнейшем в течение всего эксперимента значение это не изменялось.

Рассмотрим физическую сторону явлений, определяющих характер кривых, приведенных на рис. 84. Поскольку для исследований брались шары после различных операций (шлифовки, доводки и полировки), то, безусловно, исходная шероховатость и микротвердость их поверхностей были различными. Стремление разных по величине коэффициентов трения к какому-то постоянному значению связано с определенными физическими процессами, протекающими в зоне скользящего контакта.

Нашими экспериментами, а также экспериментами других исследователей установлено, что по аналогии со скольжением при качении в период приработки образуется новая шероховатость поверхности, отличающаяся от исходной. Для данных конкретных условий работы эта новая шероховатость оптимальна. Чтобы вскрыть причины, устанавливающие постоянный коэффициент трения, вначале необходимо выяснить причины образования оптимальной шероховатости и микротвердости трущихся поверхностей.

При сопряжении двух шероховатых металлических поверхностей в начальный момент контакт происходит по вершинам гребешков. Поэтому фактическая поверхность контакта оказывается очень малой. Ф. П. Боуден и Д. Тейбор [93] величину фактической опорной поверхности определяли измерением электрической проводимости. Ими установлено, что величина фактической опорной поверхности не зависит от формы и высоты шероховатостей сопряженных поверхностей [90].

В период приработки вершины шероховатостей сильно изнашиваются и пластически деформируются. Складывается впечатление, что поверхность не держит внешней нагрузки и сопряженные поверхности как бы врезаются друг в друга. Это происходит до момента, пока фактическая поверхность контакта не достигнет величины, достаточной, чтобы нести внешнюю нагрузку.

Площадь фактического контакта может быть определена из формулы

$$S_{\phi} = \frac{P}{\sigma_s}, \quad (101)$$

где S_{ϕ} — площадь фактического контакта; P — внешняя нагрузка, сжимающая трущиеся поверхности; σ_s — предел текучести более мягкого металла работающей пары.

Из изложенного понятен смысл первого закона трения о независимости силы трения от размеров трущихся поверхностей. Действительно,

если фактическая площадь контакта не зависит от размеров поверхностей, то, естественно, и сила трения от них не зависит.

Из выводов Боудена следует, что в условиях нормальной работы трущейся пары должно соблюдаться равенство внешней нагрузки и произведения предела текучести трущегося металла на величину фактической опорной поверхности

$$P = \sigma_s S_{\phi}. \quad (102)$$

Произведение $\sigma_s S_{\phi}$ является несущей способностью поверхности.

Физический смысл этой формулы состоит в том, что нормальная работа трущейся пары начинается с того момента, когда несущая способность поверхности, увеличиваясь, станет равной внешней нагрузке. Увеличение несущей способности происходит за счет увеличения фактической опорной поверхности и упрочнения металла в процессе пластической деформации. Следовательно, изменение несущей способности связано с геометрическим и физическим факторами. Повышение предела текучести металла в контактной зоне характеризуется повышением его микротвердости.

Соотношение между геометрическим (S_{ϕ}) и физическим (σ_s) факторами в процессе приработки непрерывно изменяется и в конце этого периода устанавливается постоянным. В начальный момент истирание и износ гребешков, а следовательно, и увеличение фактической опорной поверхности происходят более интенсивно по сравнению с интенсивностью увеличения микротвердости. Но характер дальнейшего изменения этих факторов таков, что интенсивность увеличения фактической опорной поверхности постепенно ослабевает, а интенсивность наклепа и повышения микротвердости усиливается. Ослабление действия геометрического фактора восполняется усилением действия физического фактора.

В конкретных условиях обкатки двух поверхностей микротвердость может быть повышена только до вполне определенной величины. Для других условий обкатки эта величина будет другой, но тоже вполне определенной, что зависит от склонности данного металла к наклепу. При прочих равных условиях интенсивность наклепа мягких малоуглеродистых сталей выше. Более легированные стали наклепываются менее интенсивно. Степень наклепа поверхности зависит от физико-механических свойств металла, т. е. от его физической природы (внутреннего фактора), а также от режима и условий обкатки, например скорости, давления, смазки и др. (внешнего фактора).

Взаимодействие внутренних и внешних факторов определяет степень наклепа и повышения микротвердости. Например, при прочих равных условиях с повышением теплопроводности стали концентрация тепла в поверхностных слоях снижается, следовательно, усиливается упрочнение, а проявление отрыва (или возврата) ослабевает. И наоборот, с понижением теплопроводности теплота концентрируется в более тонких поверхностных слоях, отрыв усиливается, что приводит к снижению упрочнения. При обкатке с повышенным процентом проскальзывания сильнее происходят сдвиги пачек (слоев) атомов кристаллографических решеток, т. е. увеличиваются пластическая деформация и наклеп. Склон-

ность к этому возрастает и при ухудшении смазки места контакта. Пластические деформации поверхностных слоев усиливаются и с повышением удельного контактного давления.

Если в заданном сочетании внешних и внутренних факторов, т. е. при конкретных эксплуатационных условиях, создается определенная прочность металла, характеризующаяся микротвердостью, то для получения необходимой несущей способности фактическая опорная поверхность также должна выражаться определенной величиной, т. е. должна соответствовать определенной шероховатости, которую называем оптимальной.

Следовательно, в конце периода приработки несущая способность поверхности ($\sigma_s S_{\phi}$) становится постоянной величиной, равной внешней нагрузке P . Постоянство этой величины поддерживается неизменностью величин микротвердости и шероховатости. Исходные данные микротвердости и шероховатости, изменяясь, получают оптимальные значения. Каждым конкретным эксплуатационным условиям соответствуют своя оптимальная шероховатость и микротвердость. Предположим, что металл имеет малую склонность к наклепу, тогда несущая способность поверхности при износе обеспечивается в основном за счет увеличения фактической опорной поверхности. Если исходная шероховатость была значительной, то при износе она должна уменьшаться. Следовательно, в таких случаях ее оптимальная величина всегда меньше исходной. При этом часто наблюдаются случаи, когда исходная шероховатость уже полностью износилась и смялась, а несущая способность поверхности еще не может воспринимать внешнюю нагрузку. Тогда интенсивный износ продолжается до тех пор, пока в поверхностных слоях не создается наклеп, который компенсировал бы недостаточность несущей способности. В таких условиях величина износа в период приработки может в 5—10 раз превышать величину исходной шероховатости. Предположим, что исходная шероховатость осталась такой же, как и в предыдущем случае, а металл имеет большую склонность к наклепу. Тогда при тех же условиях истирания момент равенства внешней нагрузки и несущей способности наступит раньше, так как прочность поверхности будет расти быстрее в результате интенсивного повышения наклепа. При этом оптимальная шероховатость также будет меньше своей исходной величины, но большей, чем в предыдущем примере.

В случае слишком гладких поверхностей, если несущая способность достаточная, все же при износе поверхность будет ухудшаться вследствие молекулярного схватывания. В отдельных местах смазка может выдавливаться. Совместное деформирование металлов поверхностных слоев делает возможным сближение отдельных участков на расстояния порядка постоянной кристаллической решетки, при которых могут возникнуть силы молекулярного сцепления, разрушает окисные пленки, препятствующие развитию этих сил, и создает непосредственные контакты между достаточно большими участками химически чистых (ювенильных) поверхностей трущихся металлов. При этом оптимальная шероховатость получится больше исходной. Если же при очень гладких исходных поверхностях несущая способность все же недостаточна, то в

этом случае будет происходить быстрый износ с увеличением шероховатости.

В. А. Кудинев отмечает, что предполагается наличие определенной зависимости между величиной контактной деформации v и высотой возникающих неровностей. В первом приближении можно полагать, что

$$h_{\max} = k_{\text{в. ш}} v, \quad (103)$$

где $h_{\max}$ — возобновляемая шероховатость; $k_{\text{в. ш}}$ — коэффициент возобновления шероховатости.

Пользуясь положениями гидродинамической теории, для полужидкостного трения можно записать следующее равенство:

$$\frac{\delta_0}{h_{\text{опт}}} + n_{\text{в}} = \frac{0,83k_{\text{в. ш}} + 1}{k_{\text{в. ш}} - 1}, \quad (104)$$

где δ_0 — начальная деформация; $n_{\text{в}} = h_0/h$ (h — осредненная высота клина, образованного шероховатостью; h_0 — минимальный осредненный начальный зазор между неровностями поверхностей).

Введем обозначение

$$k_h = \frac{0,83k_{\text{в. ш}} + 1}{k_{\text{в. ш}} - 1}, \quad (105)$$

тогда

$$h_{\text{опт}} = \frac{\delta_0}{k_h - n_{\text{в}}}. \quad (106)$$

Это уравнение позволяет при полужидкостном трении определять оптимальную шероховатость по начальной контактной деформации и характеристике свойств трущейся пары, выражаемой коэффициентом возобновления шероховатости.

Как отмечалось, между шероховатостью и микротвердостью при изнашивании поддерживается определенное соотношение. В момент создания более прочной поверхности начинается период нормального износа. Такова общая картина образования оптимальной шероховатости и микротвердости.

Относительно конкретных условий обкатки шаров можно отметить следующее. Закаленная сталь ШХ15 обладает низкой теплопроводностью и относительно малой склонностью к наклепу. В результате низкой теплопроводности стали в тончайших верхних слоях ее концентрируется тепло. Эти слои находятся на большой и прочной поддерживающей массе глубинного металла. В таких условиях поверхность твердо закаленной стали в контактной зоне пластически деформируется. Но несущая способность поверхности оказывается недостаточной, и она восполняется за счет уменьшения в процессе приработки исходной шероховатости и увеличения в связи с этим фактической опорной площади. Поэтому в наших экспериментах оптимальная шероховатость становится меньше исходной. Следовательно, в данном случае поверхностный слой в период приработки упрочняется и на нем образуется более мелкая шерохо-

ватость. Как и в любом случае работы трущихся пар при качении с некоторым проскальзыванием (это имело место в наших экспериментах), а также при работе шарико- и роликоподшипников трение (или сопротивление движению) образуется в результате механического сцепления отдельных шероховатостей сопряженных поверхностей, а также молекулярного схватывания отдельных участков этих поверхностей. Поскольку в период приработки при износе создается наклеп, то при дальнейшей работе исследуемой пары явление схватывания резко ослабевает, так как более твердые поверхности больше сопротивляются взаимному «проникновению» друг в друга. Это способствует уменьшению коэффициента трения. В процессе приработки образцы становятся гладкими, поэтому эффект механического зацепления шероховатостей будет оказывать меньшее влияние на сопротивление движению. Следовательно, это способствует уменьшению коэффициента трения, который особенно заметно снижается при одновременном и совместном действии двух указанных факторов.

ДОВОДКА МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ С РЕГЛАМЕНТИРОВАННЫМ ПО ВЕЛИЧИНЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА РАЗЖИМОМ ПРИТИРА

Одним из новых прогрессивных способов доводки отверстий является процесс, обеспечивающий поддержание во время доводки заданной величины крутящего момента. Некоторые результаты доводки отверстий этим способом представлены выше. Проведенные ранее исследования были расширены. Дополнительно изучено влияние материала и твердости разжимного притира на его работоспособность, проведено широкое экспериментальное исследование совместного влияния основных факторов на процесс доводки малых отверстий, а также поиск оптимальных условий этого процесса. Эти исследования были спланированы по методике полного факторного эксперимента.

Опыты проводились на образцах, изготовленных из сталей ШХ15, ХВГ, 18Х2Н4ВА. Образцы термообрабатывались до твердости HRC 58—62. Экспериментальное исследование производилось на специальной установке с автоматическим разжимом притира, конструкция которой описана в гл. III.

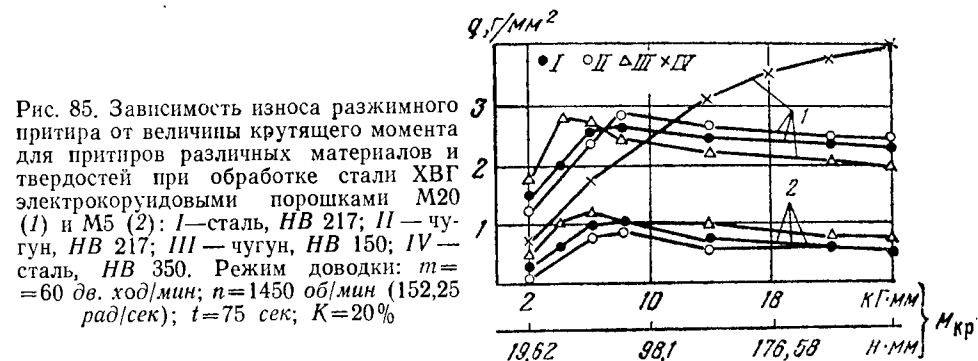
В качестве абразивных материалов использовали электрокорунд, алмаз и карбид кремния. Зернистость абразива изменялась от М50 до М5, концентрация K — от 5 до 80%. Другими составляющими паст были олеиновая кислота, стеарин и веретенное масло. Применялся метод однократного нанесения доводочной пасты на разжимный притир перед вводом его в обрабатываемое отверстие.

Для измерения диаметров, конусности и искривления оси отверстия применялись пневматические длиномеры завода «Калибр» типа ДП с трубкой 1 : 1000. Для высокоточных измерений погрешностей геометрической формы цилиндрических поверхностей в поперечном сечении использовался прибор «Теллеронд-51» фирмы «Тейлор-Гобсон» (Англия).

Шероховатость поверхности (R_z , R_a) определялась на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр». Температура притира $T_{пр}$ и детали T_d определялась с помощью двух хромель-копелевых термопар с диаметром проволок 0,1 мм. Износ притира q и съем металла W с детали находили взвешиванием образцов и притиров до и после опыта на аналитических весах АДВ 200. Параллельно производились линейные измерения.

1. Влияние материала и твердости разжимного притира на его работоспособность

На уменьшение шероховатости доведенной поверхности и износостойкости самого инструмента существенное влияние оказывает правильный выбор материала и твердости притира. В серии экспериментов доводились отверстия диаметром 6 мм и длиной 20 мм. Доводка осуществлялась с применением разжимных притиров, изготовленных из сталей 45 и



65Г, чугунов СЧ 21-40 и СЧ 28-48. Твердость притиров изменялась от HB 150 до HB 350. Использовали доводочные пасты АСР 50/40 + КЗ М28, ЭБМ20, ЭБМ5. Концентрация абразивных зерен в пасте составляла 20%. Остальные компоненты пасты: олеиновая кислота — 38,6%; стеарин — 29,8; веретенное масло — 11,6%.

Результаты экспериментов приведены на рис. 85 и в табл. 54. Из рисунка видно, что чугунные и стальные притиры одинаковой твердости имеют аналогичные закономерности износа (I и II). Уменьшение твердости притира до HB 150 (кривая III) смещает пик кривой износа в сторону меньших крутящих моментов. С увеличением твердости до HB 350 износ (кривая IV) максимума не имеет. С увеличением крутящего момента износ такого притира непрерывно возрастает.

Анализируя данные, приведенные в табл. 54, отметим, что стальные и чугунные притиры равной твердости обеспечивают практически одинаковый съем металла с детали. Уменьшение твердости материала притира приводит к увеличению съема металла. С повышением твердости до HB 350 съем металла и износ самого притира уменьшились. Это отчетливо видно на примере доводки отверстий пастой ЭБМ5. Причем, если при крутящем моменте, равном 2 кг·мм (19,62 н·мм), съем почти в 3 раза превышает износ закаленного притира, то при 8 кг·мм (78,48 н·мм) износ притира примерно равен съему металла с детали. Это положение было проверено при доводке с $M_{кр}=20$ кг·мм (196,2 н·мм) и твердости притира HB 350. В данном случае износ притира был больше, чем съем металла с детали.

Результаты экспериментов по доводке отверстий в деталях из стали 18Х2Н4ВА
(продолжительность доводки 60 сек)

Режим обработки	Материал и твердость притира	W	q	R_z	Овальность отверстия	Искривле- ние оси от- верстия
		мм/диаметр				
		мм				
$M_{кр}=20 \text{ кг}\cdot\text{мм}$ (196,2 н·мм), $n=2000 \text{ об/мин}$ (210 рад/сек), $t=80 \text{ дв.ход/мин}$, АСП 50/40+КЗ М28	Чугун СЧ 21-40, НВ 190	0,095				
	Чугун СЧ 28-48, НВ 217	0,090	0,015	1,4	3,0	5,0
	Сталь 45, НВ 217	0,090				
$M_{кр}=8 \text{ кг}\cdot\text{мм}$ (78,48 н·мм), $n=700 \text{ об/мин}$ (73,5 рад/сек), $t=120 \text{ дв.ход/мин}$, ЭБМ5	Чугун СЧ 28-48, НВ 217	0,02	0,011	0,20		
	Сталь 45, НВ 217	0,02	0,010	0,20	0,5	0,5
	Сталь 65Г, НВ 350	0,007	0,005	0,18		
$M_{кр}=2 \text{ кг}\cdot\text{мм}$ (19,62 н·мм), $n=700 \text{ об/мин}$ (73,5 рад/сек), $t=120 \text{ дв.ход/мин}$, ЭБМ5	Чугун СЧ 28-48, НВ 217	0,0050	0,002	0,18		
	Сталь 45, НВ 217	0,0050	0,002	0,18	0,5	0,5
	Сталь 65Г, НВ 350	0,0035	0,001	0,15		

Полученные результаты объясняются механизмом действия абразивных зерен, находящихся в зоне доводки, в зазоре между притиром и деталью. Проведено исследование микрорельефа рабочей поверхности разжимных притиров. Изучение состояния рабочей поверхности притира, а также абразивных зерен, внедренных в его поверхность, проводилось на металлографических микроскопах МИМ-7, МИМ-8 и электронном микроскопе УЭМВ-100В. Для выявления абразивных зерен, внедренных в поверхность притира или детали, использовали съемку в поляризованном свете. Установлено, что по сравнению с чугунными (рис. 86, а) стальные притиры (рис. 86, б) в исходном состоянии (после шлифования) имеют мало раковин и углублений для размещения абразивных зерен. В процессе доводки на поверхности стальных незакаленных притиров (так же, как и на чугунных) абразивные зерна при внедрении оставляют характерные углубления, размеры которых возрастают с увеличением крутящего момента в зоне доводки.

Рабочая поверхность стальных закаленных притиров до и после обработки практически не изменяется. Характер микрорельефа у обоих образцов одинаков. Полученные данные позволяют предположить, что в процессе доводки стальными закаленными притирами большинство абразивных зерен, находящихся в зоне доводки, остается свободными и лишь незначительная часть внедряется.

Уменьшение твердости материала притира способствует лучшему внедрению зерен в притир и удерживанию их в его поверхности в процессе обработки. Доводка в этом случае осуществляется с преобладанием закрепленных в притире зерен над незакрепленными, находящимися в свободном состоянии. Незакрепленные зерна в процессе доводки перекатываются, оставляя на поверхности характерные углубления. Поэтому уменьшение твердости притира в экспериментах привело к увели-

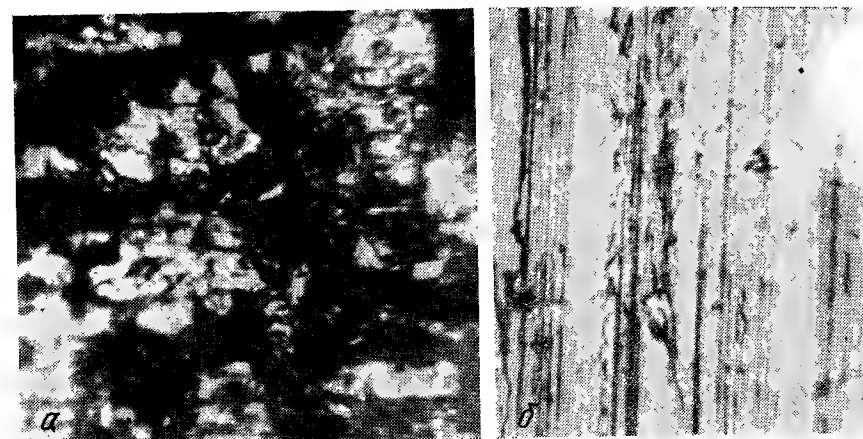


Рис. 86. Рабочая поверхность разжимных притиров: а — чугун СЧ 28-40 ($\times 500$); б — сталь, НВ 180 ($\times 100$)

чению съема металла с детали как при доводке пастой ЭБМ5, так и пастой, состоящей из двух абразивов: АСП 50/40+КЗМ28.

Использование в качестве материала притира закаленной стали НВ 350 приводит к изменению механизма действия зерен в зоне доводки. Процесс осуществляется с преобладанием в зоне доводки свободных зерен, при этом главную роль в механизме доводки играет царапающее действие абразивных зерен. Поэтому при $M_{кр}=20 \text{ кг}\cdot\text{мм}$ (196,2 н·мм) износ притира, имеющего меньшую твердость по сравнению с твердостью детали, оказался больше, чем съем металла с детали. Когда в зоне доводки преобладают свободные абразивные зерна, то уменьшение крутящего момента ведет к тому, что царапающее действие абразивных зерен снижается, а эффект химического воздействия доводочной пасты на обрабатываемую поверхность увеличивается. Снятие окисных пленок с поверхности детали в этом случае приобретает в механизме доводки решающее значение. Поэтому увеличение твердости притира с НВ 217 до НВ 350 привело при $M_{кр}=2 \text{ кг}\cdot\text{мм}$ (19,62 н·мм) к снижению износа притира. Одновременно также немного уменьшился и съем металла с детали. Это подтверждает то, что основу механизма доводки при $M_{кр}=2 \text{ кг}\cdot\text{мм}$ (19,62 н·мм) составляет съем окисных пленок с поверхности детали. Разница в съеме металла с детали показывает, что царапающее

действие зерен при доводке мягкими притирами сохраняется в большей степени, чем твердыми; сами они изнашиваются также больше, чем твердые.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при предварительной доводке, где решающее значение имеет увеличение съема металла с детали, оптимальной твердостью материала притира можно считать HV 100—150. Такая твердость обеспечивает хорошее внедрение абразивных зерен в поверхность притира. В качестве материала притира можно использовать медь, алюминий, серый чугун.

При окончательной доводке износ притира определяет точность доводки. На этой стадии целесообразно добиться минимального износа. Для уменьшения износа твердость разжимных притиров должна быть выше, чем твердость притиров для предварительной доводки. Минимальным значением твердости разжимных притиров для окончательной доводки, очевидно, является HV 220—230.

В случае применения малых удельных давлений при окончательной доводке имеется возможность использовать притиры высокой твердости, например из закаленной быстрорежущей стали, подобно тому, как это было сделано для случая плоской притирки в работе [59].

2. Многофакторное экспериментальное исследование процесса доводки

Для дальнейшего изучения механизма взаимодействия абразивных зерен с поверхностями притира к детали, а также для создания математической модели абразивной доводки малых отверстий при регламентированных крутящих моментах исследовалось влияние ряда переменных факторов на процесс и результаты доводки. Учитывалось одновременное действие многих параметров. Проведение экспериментов было спланировано и осуществлялось по методике полного факторного эксперимента. В этой серии опыты проводились с ориентацией на чугунные притиры с HV 190—217, которые пока наиболее широко используются в промышленности. Доводились отверстия $\varnothing 6$ мм, длиной 20 мм в деталях из стали 18Х2Н4ВА. Доводка осуществлялась с предварительным однократным нанесением на притир доводочной пасты. При предварительной доводке применялась паста ЭБМ20, при окончательной — ЭБМ5. Продолжительность опытов изменялась от 1 до 60 сек.

Данные изменения каждого из переменных факторов (продолжительности доводки t , скорости вращения детали n , крутящего момента $M_{кр}$, частоты возвратно-поступательных перемещений притира m и концентрации абразивных зерен K в пасте) приведены в табл. 55. Интервалы изменения переменных факторов были приняты на основе предварительных однофакторных экспериментов. В таблице приведены также средние значения выходных параметров доводки (съема металла с детали W , износа притира q , шероховатости обработанной поверхности R_z , температуры детали T_d и притира $T_{пр}$), полученные как среднеарифметическое значение пяти повторенных опытов.

При проведении экспериментов и обработке полученных данных использовали вероятностно-статистические методы и методы математического планирования эксперимента. При этом за математическую модель описания связи между параметрами доводки и элементами режима обработки были приняты следующие зависимости:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{n+1} X_1 X_2 + \dots, \quad (107)$$

гиперболическая:

$$Y = \beta'_0 + \frac{\beta_1}{X_1} + \frac{\beta_2}{X_2} + \dots + \frac{\beta_n}{X_n}, \quad (108)$$

логарифмическая:

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} X_3^{\beta_3} \dots, \quad (109)$$

где Y — один из параметров процесса доводки; X_i — переменные факторы; β_i — коэффициенты уравнения регрессии.

Расчет коэффициентов β_i осуществлялся по специальной методике [150, 151]. В табл. 56 приведены уравнения регрессии, полученные на основе линейной и логарифмической функций. Для оценки полученных уравнений регрессии (приблизенно аппроксимирующих процесс доводки) применялась статистическая обработка результатов экспериментов методами множественного корреляционного и регрессионного анализов.

Уравнения, полученные на основе результатов опытов (табл. 55, столбцы 8 и 9), в табл. 56 отмечены звездочками. Аналогично получены другие зависимости.

Кроме определения необходимых статистических критериев, устанавливалось значение коэффициентов парной и множественной корреляции (табл. 57). Из таблицы видно, что ряд параметров тесно не связан с переменными факторами. Наименьшие значения коэффициентов парной корреляции (ниже критического) подчеркнуты в табл. 57 одной чертой. В то же время значение коэффициента множественной корреляции во всех случаях велико (приближается к единице). Это указывает на то, что принятые к исследованию переменные факторы на процесс доводки оказывают решающее влияние.

Статистическая обработка результатов экспериментов показала, что ряд коэффициентов в уравнениях регрессии является незначимым (ввиду незначительной связи между параметрами доводки и переменными факторами). Поэтому в табл. 56 слагаемые с незначимыми коэффициентами β_i отсутствуют.

Выбор наилучшего уравнения из всей совокупности полученных зависимостей производился на основе принципа наименьших квадратов. При условии адекватности уравнений, лучшим считалось то, для которого сумма квадратов отклонений была наименьшей. Результаты выбора уравнений регрессии показывают, что для описания связи износа притира q , съема металла с детали W , температуры притира $T_{пр}$ и детали T_d лучшими являются уравнения на основе логарифмической зави-

Таблица 55

Общая матрица планирования эксперимента

Условные обозначения	Переменные факторы					Результаты опытов										
	t, сек	n, об/мин (рад/сек)	M _{кр} , кг·м (н·м)	m г/ход мин	K, вес. %	предварительная доводка, паста ЭБМ20					окончательная доводка, паста ЭБМ5					
						q	W	R _z	T _д	T _{пр}	q	W	R _z	T _д	T _{пр}	
Основной уровень	30,5	1350 (141,75)	15 (147,15)	90	35					° C (° K)						
Интервал варьирования	59	1300 (136,5)	14 (137,34)	60	34					° C (° K)						
Верхний уровень	60	2000 (210)	22 (215,82)	120	52					° C (° K)						
Нижний уровень	1	700 (73,5)	8 (78,48)	60	18					° C (° K)						
Опыт 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Опыт 1	+	+	+	+	+	+	9,16	27,2	0,7	42(315)	46(319)	8,40	24,1	0,3	40(313)	50(323)
Опыт 2	+	+	+	+	+	+	3,8	6,10	0,9	20,5(293,5)	20(293)	2,50	1,62	0,5	20(293)	21(294)
Опыт 3	+	+	+	+	+	+	8,45	18,8	0,8	30(303)	35(308)	6,15	15,0	0,3	30(303)	36(309)

4	+	+	+	+	+	2,00	2,44	0,9	21(294)	20(293)	1,50	1,11	0,5	20(293)	21(294)
5	+	+	+	+	+	7,94	11,4	0,55	32(305)	38(311)	8,00	8,35	0,25	37(310)	40(313)
6	+	+	+	+	+	3,10	1,86	0,9	20(293)	20(293)	1,60	0,60	0,5	21(294)	20(293)
7	+	+	+	+	+	6,70	7,20	0,7	28(301)	30(303)	5,70	6,30	0,2	30(303)	30(303)
8	+	+	+	+	+	1,60	1,13	0,9	20(293)	20(293)	1,25	0,45	0,5	20(293)	22(295)
9	+	+	+	+	+	5,70	22,6	0,4	45(318)	50(323)	7,00	17,1	0,11	50(323)	57(330)
10	+	+	+	+	+	3,00	4,20	0,9	20(293)	20(293)	1,35	1,97	0,5	21(294)	20(293)
11	+	+	+	+	+	6,15	15,6	0,6	40(313)	40(313)	6,00	13,0	0,15	30(303)	35(308)
12	+	+	+	+	+	2,10	3,00	0,9	20(293)	20(293)	1,05	1,35	0,5	20(293)	20(293)
13	+	+	+	+	+	8,30	15,0	0,6	38(311)	42(315)	6,30	10,8	0,15	32(305)	38(311)
14	+	+	+	+	+	2,25	2,75	0,9	20(293)	20(293)	1,65	0,71	0,5	20(293)	20(293)
15	+	+	+	+	+	6,60	9,16	0,8	30(303)	30(303)	6,00	5,50	0,15	30(303)	33(306)
16	+	+	+	+	+	1,50	1,10	0,9	20(293)	20(293)	1,10	0,60	0,5	20(293)	20(293)
17	+	+	+	+	+	5,15	25,8	0,6	42(315)	48(321)	6,00	19,1	0,2	45(318)	60(333)
18	+	+	+	+	+	2,10	4,50	0,9	20(293)	20(293)	0,90	2,10	0,5	20(293)	20(293)
19	+	+	+	+	+	4,35	19,1	0,6	29(302)	35(308)	3,65	12,0	0,3	35(308)	40(313)
20	+	+	+	+	+	1,54	2,58	0,9	20(293)	20(293)	0,72	1,28	0,5	20(293)	20(293)
21	+	+	+	+	+	6,00	17,1	0,6	33(306)	38(311)	5,55	9,90	0,35	38(311)	42(315)
22	+	+	+	+	+	1,90	2,70	0,9	20(293)	21(294)	0,90	0,73	0,5	20(293)	20(293)
23	+	+	+	+	+	4,50	12,4	0,7	28(301)	30(303)	3,70	7,20	0,14	32(305)	36(309)
24	+	+	+	+	+	1,80	1,47	0,9	20(293)	20,5(293,5)	0,75	0,60	0,5	20(293)	22(295)
25	+	+	+	+	+	5,00	22,8	0,4	55(328)	65(338)	3,70	17,0	0,11	60(333)	70(343)
26	+	+	+	+	+	1,80	6,20	0,9	21(294)	20,5(293,5)	0,75	1,56	0,5	20(293)	20(293)
27	+	+	+	+	+	3,15	15,8	0,5	40(313)	41(314)	2,85	10,6	0,2	37(310)	42(315)
28	+	+	+	+	+	1,10	3,00	0,9	20(293)	20,5(293,5)	0,75	1,10	0,5	21(294)	20(293)
29	+	+	+	+	+	5,65	18,0	0,35	45(318)	47(320)	3,60	8,10	0,12	42(315)	46(319)
30	+	+	+	+	+	1,65	2,60	0,9	20(293)	20(293)	0,72	0,84	0,5	20(293)	20(293)
31	+	+	+	+	+	4,36	9,16	0,5	33(306)	36(309)	3,30	5,40	0,18	32(305)	36(309)
32	+	+	+	+	+	1,10	1,20	0,9	21(294)	20(293)	0,73	0,51	0,5	20(293)	20(293)

Таблица 56

Сводная карта линейных и логарифмических уравнений регрессии

Функ- ция	Паста	Параметр двойки	Уравнение регрессии
Линейная	ЭБМ20	$\overline{W}$	* $Y = 9,8 + 6,9X_1 + 2,12X_2 + 2,68X_3 + 0,3X_4 - 0,5X_5 + 1,2X_1X_2 + 1,3X_1X_3 + 0,88X_1X_4 + 0,3X_1X_5 + 0,6X_3X_4 + 0,9X_2X_3 + 0,5X_3X_5$
		q	* $Y = 4,05 + 2,0X_1 + 0,48X_2 + 0,34X_4 + 0,85X_5 - 0,16X_1X_3 + 0,12X_1X_4 + 0,39X_1X_5 + 0,2X_3X_4 + 0,16X_3X_5 + 0,12X_4X_5$
		$\overline{R_z}$	$Y = 0,75 - 0,155X_1 - 0,03X_2 + 0,03X_4 + 0,035X_5 + 0,03X_1X_4 + 0,03X_1X_5 - 0,02X_1X_2 + 0,02X_4X_5$ ($Y = 0,747 - 0,0056t + 0,001m + 0,0018K$)
		T_n	$Y = 28,4 + 8,3X_1 + 2,3X_2 + 1,8X_3 - 1,6X_4 + 2,3X_1X_2 + 1,7X_1X_3 - 1,9X_1X_4$
Логариф- мическая	ЭБМ20	T_{np}	$Y = 30,4 + 10,0X_1 + 3,0X_2 + 2,2X_3 + 3,0X_1X_2 + 2,2X_1X_3 - 1,6X_1X_4 - 1,0X_5 - 1,0X_1X_5$
		$\overline{W}$	* $Y = -4,0 + 0,44 \ln X_1 + 0,51 \ln X_2 + 0,66 \ln X_3 - 0,11 \ln X_5 - \ln 10^5$
		$\overline{q}$	* $Y = -4,8 + 0,27 \ln X_1 + 0,30 \ln X_2 + 0,26 \ln X_4 + 0,41 \ln X_5 - \ln 10^5$

Линейная	ЭБМ5	R_z	$Y = +0,786 - 0,28 \ln X_1 - 0,13 \ln X_2 + 0,175 \ln X_4 + 0,10 \ln X_5 - 0,14 \ln X_3$
		$\overline{T_n}$	$Y = 2,20 + 0,144 \ln X_1 + 0,116 \ln X_2 + 0,009 \ln X_3$
		$\overline{T_{np}}$	$Y = 1,74 + 0,165 \ln X_1 + 0,138 \ln X_2 + 0,10 \ln X_3$
		$\overline{W}$	$Y = 6,5 + 5,4X_1 + 1,34X_2 + 2,28X_3 + 0,45X_4 - 0,33X_5 + 1,1X_1X_2 + 1,85X_1X_3 + 0,3X_1X_5 + 0,3X_3X_5 + 0,4X_1X_4 + 0,45X_2X_3 + 0,35X_3X_4$
Логарифмическая	ЭБМ5	q	$Y = 3,26 + 2,12X_1 + 0,43X_2 + 0,85X_5 + 0,27X_1X_2 + 0,2X_1X_4 + 0,48X_1X_5 + 0,22X_2X_4$
		R_z	$Y = 0,35 - 0,15X_1 + 0,003X_3 + 0,027X_4 + 0,027X_1X_4$ ($Y = 0,41 - 0,005t + 0,00058M_{np} + 0,0009 m$)
		$\overline{T_n}$	$Y = 22,8 + 8,75X_1 + 2,8X_2 + 1,7X_3 - 1,3X_5 + 2,8X_1X_2 + 1,75X_1X_3 - 1,3X_1X_5 + 1,5X_2X_3$
		T_{np}	$Y = 30,0 + 11,5X_1 + 3,5X_2 + 2,7X_3 - 1,6X_5 + 3,5X_1X_2 + 2,7X_1X_3 - 1,7X_1X_5$
		$\overline{W}$	$Y = -4,62 + 0,59 \ln X_1 + 0,366 \ln X_2 + 0,76 \ln X_3 - \ln 10^5$
		$\overline{q}$	$Y = -4,59 + 0,4 \ln X_1 + 0,24 \ln X_2 + 0,26 \ln X_4 + 0,52 \ln X_5 - \ln 10^5$
		R_z	$Y = -0,6 - 0,24 \ln X_1 - 0,15 \ln X_2 - 0,24 \ln X_3 + 0,38 \ln X_4$
		$\overline{T_n}$	$Y = 1,8 + 0,148 \ln X_1 + 0,13 \ln X_2 + 0,08 \ln X_3$
		$\overline{T_{np}}$	$Y = 1,60 + 0,18 \ln X_1 + 0,15 \ln X_2 + 0,118 \ln X_3$

Результаты статистической обработки экспериментальных данных

Параметр доводки	Функция	Коэффициенты парной корреляции					Коэффициент множественной корреляции R_M	Критерии влияния коэффициентов β_i					Доверительный интервал $\Delta \beta_i$
		r_t	r_n	$r_{M_{кр}}$	r_m	r_h		$k_{\beta(t)}$	$k_{\beta(n)}$	$k_{\beta(M_{кр})}$	$k_{\beta(m)}$	$k_{\beta(k)}$	
ЭБМ20	Линейная	0,84	0,31	0,35	0,06	0,06	0,94	72,0	21,6	26,4	0,10	4,80	0,0210
		0,75	0,26	0,08	0,13	0,33	0,9	47,5	13,0	0,85	7,60	18,7	0,0198
		-0,79	-0,105	-0,015	0,15	0,15	0,83	23,2	4,5	0,9	4,5	5,3	0,0112
		0,90	0,187	0,156	0,05	0,05	0,91	29,0	6,1	4,8	1,5	1,5	0,0160
		0,92	0,19	0,14	0,10	0,05	0,92	34,0	7,4	5,5	1,4	1,5	0,0166
ЭБМ5	Линейная	0,88	0,199	0,32	0,04	0,048	0,92	105,0	16,5	33,0	1,30	1,30	0,0190
		0,89	0,109	0,08	0,107	0,247	0,93	82,0	12,5	1,4	9,00	28,0	0,0166
		-0,94	0,0059	0,025	0,17	0,002	0,96	40,5	0,001	1,8	7,3	0,003	0,0060
		0,9	0,2	0,125	0,05	0,1	0,9	16,4	5,5	4,5	1,6	1,0	0,0183
		0,91	0,2	0,15	0,03	0,09	0,91	36,0	8,0	6,0	1,2	1,4	0,0166

симости (уравнение (109)). Для описания же связи шероховатости наиболее приемлема линейная зависимость (уравнение (107)). В итоге математическая модель процесса доводки отверстий чугунами разжимными притирами может быть представлена уравнениями регрессии, отмеченными в табл. 56, квадратиком.

После потенцирования названных уравнений получаем:
для предварительной доводки (сталь 18Х2Н4ВА)

$$W = \frac{t^{0,44} n^{0,51} M_{кр}^{0,66}}{2,72^{4,0} K^{0,11} \cdot 10^5}, \quad (110)$$

$$q = \frac{t^{0,27} n^{0,3} K^{0,41} m^{0,26}}{2,72^{4,08} \cdot 10^5}, \quad (111)$$

$$R_z = 0,747 - 0,0056t + 0,001m + 0,0018K, \quad (112)$$

$$T_d = 2,72^{2,20} t^{0,144} n^{0,116} M_{кр}^{0,009}, \quad (113)$$

$$T_{пр} = 2,72^{1,74} t^{0,165} n^{0,138} M_{кр}^{0,10}; \quad (114)$$

для окончательной доводки (сталь 18Х2Н4ВА)

$$W = \frac{t^{0,59} n^{0,366} M_{кр}^{0,76}}{2,72^{4,62} \cdot 10^5}, \quad (115)$$

$$q = \frac{t^{0,4} n^{0,24} K^{0,52} m^{0,26}}{2,72^{4,59} \cdot 10^5}, \quad (116)$$

$$R_z = 0,41 - 0,005t + 0,00058M_{кр} + 0,0009m, \quad (117)$$

$$T_d = 2,72^{1,8} t^{0,148} n^{0,13} M_{кр}^{0,08}, \quad (118)$$

$$T_{пр} = 2,72^{1,60} t^{0,18} n^{0,15} M_{кр}^{0,118}. \quad (119)$$

Из приведенных формул видно, что на параметры доводки решающее влияние оказывают различные переменные факторы. Так, например, износ притира (уравнение (111)) определяют следующие параметры: время t , скорость вращения детали n , концентрация абразива в пасте K , число двойных ходов притира m , в то время как съем металла с детали при окончательной доводке (уравнение (115)) зависит от таких факторов, как крутящий момент $M_{кр}$, скорость вращения детали n и продолжительность процесса t .

Сравнивая приведенные зависимости для предварительной и окончательной доводки между собой, можно отметить, что одинаковые параметры определяются в основном одними и теми же переменными факторами. Например, уравнения (111), (113), (114) и (116), (118), (119) содержат одинаковые параметры. Это значит, что процесс доводки с изменением размера абразивного зерна сохраняет свою физическую сущность.

Изменение одинаковых факторов по-разному сказывается на характере изменения различных параметров доводки. Так, например, увеличение продолжительности процесса t увеличивает износ притира q и сьем металла W , но уменьшает величину R_z . В первых двух случаях (уравнения (110), (111)) t приведен со знаком «плюс», а в уравнении (112) — со знаком «минус». Этим и объясняется такая разница в действии фактора времени.

Используя результаты статистической обработки экспериментов, приведенные в сводной табл. 57, можно ответить на вопрос, какой из факторов в уравнении оказывает наибольшее влияние на данный параметр, а какой наименьшее. Для этого обычно используют критерий влияния коэффициентов. Например, в уравнении (116) наибольшее влияние на износ притира оказывает время t (критерий значимости 82,0), меньшее — концентрация абразива K (критерий значимости 28,0) и скорость вращения детали n (12,5) и самое малое — число двойных ходов m (9). $M_{кр}$ здесь является незначимым, оказывая весьма малое влияние (коэффициент парной корреляции 0,08), поэтому его и «вывели» из уравнения (116).

В различных уравнениях незначимыми являются разные переменные факторы. Так, в уравнении (111) на износ притира не оказывает влияния крутящий момент $M_{кр}$. Это вполне закономерно, так как увеличение его влечет за собой лучшее внедрение зерен абразива в притир и не сказывается на увеличении износа последнего, потому что наибольший вред притиру наносят свободные зерна.

В уравнении (115) незначимыми являются число двойных ходов m и концентрация абразива K . С увеличением числа двойных ходов m удлиняется путь, пройденный абразивным зерном, и поэтому сьем металла с детали должен был возрасти, однако при этом увеличивается количество выходов притира из детали. Это вызывает разбрызгивание пасты, в результате сьем металла возрастает незначительно. С повышением концентрации абразива в пасте количество зерен, участвующих в процессе доводки, становится больше. Поэтому уменьшается удельное давление, приходящееся на одно зерно, ухудшается закрепление их в притире, в связи с чем происходит не увеличение, а часто даже небольшое снижение съема металла с детали, как и в уравнении (110).

В уравнениях (113), (114) незначимыми являются число двойных ходов m и концентрация абразива K . С увеличением числа двойных ходов учащается выход притира из отверстия, а с повышением концентрации абразива увеличивается зазор между деталью и притиром. Оба фактора не оказывают решающего влияния на увеличение съема металла с детали, а следовательно, и на нагрев детали и притира.

Проанализируем полученные зависимости. Для наглядности изобразим их графически (рис. 87—90). На рисунках приведены данные для стали 18Х2Н4ВА.

Влияние крутящего момента ($M_{кр}$). С увеличением крутящего момента возрастает удельное давление в зоне доводки. При этом сьем металла с детали (см. рис. 87) возрастает. Это объясняется тем, что с повышением давления увеличивается степень проникновения зерен в

притир, они крепче удерживаются в более мягком металле и поэтому работоспособность их выше. Причем, как видно из графиков, более крупные зерна М20 имеют большую производительность по сравнению с зернами М5. С возрастанием давления износ притира также становится более интенсивным, однако этот показатель настолько незначителен, что при статистической обработке он не вошел в уравнение. В уравнениях (111) и (116) $M_{кр}$ отсутствует. Нагрев притира и детали (рис. 87) возрастает незначительно, причем притир более сильно нагревается при окончательной доводке, чем при предварительной. На степень шерохова-

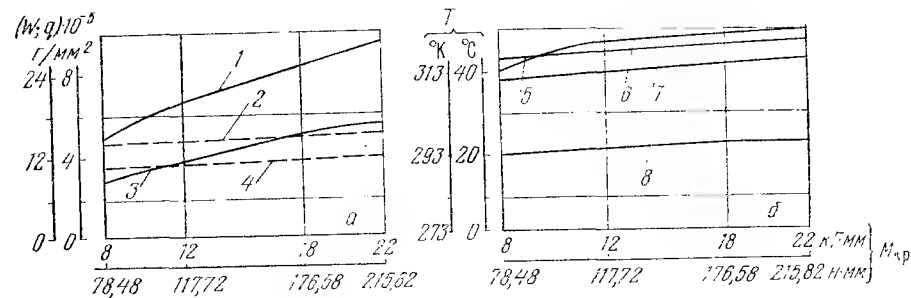


Рис. 87. Влияние крутящего момента: а — на сьем металла и износ притира; б — на температуру детали и притира; 1, 3 — W соответственно для М20 и М5; 2, 4 — q соответственно для М20 и М5; 5, 6 — $T_{пр}$ соответственно для М5 и М20; 7, 8 — T_d соответственно для М5 и М20. Режим доводки: $m=60$ дв. ход/мин; $n=2000$ об/мин (210 рад/сек); $t=60$ сек; $K=18\%$

тости обработанной поверхности при предварительной доводке крутящий момент в исследованном интервале практически не оказывает влияния (уравнение 112)), при окончательной с увеличением давления шероховатость обработки ухудшается (уравнение (117)).

Влияние скорости доводки. С увеличением скорости вращения детали сьем металла с нее W , как и следовало ожидать, возрастает (рис. 88), причем тем значительнее, чем больше размер абразивных зерен. Так, при предварительной доводке W увеличивается в 2 раза, в то время как при окончательной с той же скоростью — только в 1,5 раза. При этом притир также изнашивается быстрее в связи с тем, что с возрастанием скорости путь, пройденный свободным зерном по поверхности притира, становится больше. Механизм процесса доводки с увеличением скорости не изменяется, так как закрепленность абразивных зерен в притире остается прежней, но увеличивается эффект действия свободных зерен. Поэтому износ притира возрастает с повышением скорости вращения.

Температура в зоне доводки (см. рис. 88) с повышением скорости вращения детали возрастает, что вызвано увеличением пути трения каждого зерна об обрабатываемую поверхность. При этом притир, имеющий меньшую массу и худшую теплопроводность, нагревается сильнее. На шероховатость обрабатываемой поверхности скорость вращения детали влияния не оказывает.

Влияние скорости возвратно-поступательного перемещения. С возрастанием скорости возвратно-поступательного перемещения притира увеличение съема металла с детали оказалось незначительным, притир при этом изнашивается больше (уравнения (111) и (116)).

Влияние концентрации абразивных зерен в пасте. С увеличением количества абразивных зерен в пасте K (рис. 89) при доводке электрокорундом М20 съем металла с детали уменьшается, а при использовании М5 остается почти без изменения. Это можно объяснить тем, что с по-

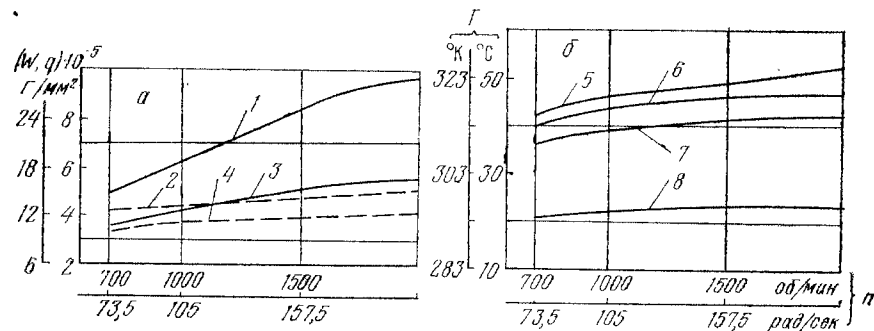


Рис. 88. Влияние скорости вращения детали: а — на съем металла и износ притира; б — на температуру детали и притира; 1, 3 — W соответственно для М20 и М5; 2, 4 — q соответственно для М20 и М5; 5, 6 — $T_{пр}$ соответственно для М5 и М20; 7, 8 — T_d соответственно для М5 и М20. Режим доводки: $m=60$ дв. ход/мин; $t=60$ сек; $K=18\%$; $M_{кр}=22$ кг·мм (215,82 н·мм)

вышением концентрации зерен в пасте внедрение их в притир ослабевает, а следовательно, уменьшается их царапающее действие. При окончательной же доводке такого уменьшения не происходит, потому что абразивные зерна малых размеров имеют более острые режущие кромки по сравнению с крупными и потому не снижают режущей способности при увеличении концентрации абразива в пасте.

Износ притира (рис. 89) с повышением концентрации абразива как при предварительной, так и при окончательной доводке возрастает примерно на одну и ту же величину. На шероховатость поверхности увеличение концентрации абразива оказывает незначительное влияние.

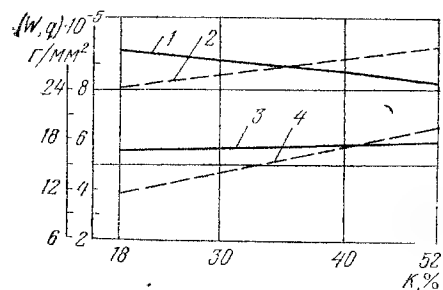


Рис. 89. Зависимость съема металла и износа притира от концентрации абразивных зерен в доводочной пасте: 1, 3 — W соответственно для М20 и М5; 2, 4 — q соответственно для М20 и М5. Режим доводки: $m=60$ дв. ход/мин; $n=2000$ об/мин (210 рад/сек); $t=60$ сек; $M_{кр}=22$ кг·мм (215,82 н·мм)

Влияние продолжительности процесса. Съем металла W с увеличением длительности процесса возрастает (рис. 90). Однако прямая пропорциональная зависимость здесь отсутствует. Поэтому установить средний съем металла в единицу времени весьма затруднительно. Снижение его во времени объясняется тем, что в процессе доводки происходит затупление абразивных зерен, которое обычно сопровождается вырыванием их из притира с последующим перезакреплением или разрушением и вызывает уменьшение интенсивности роста производительности доводки.

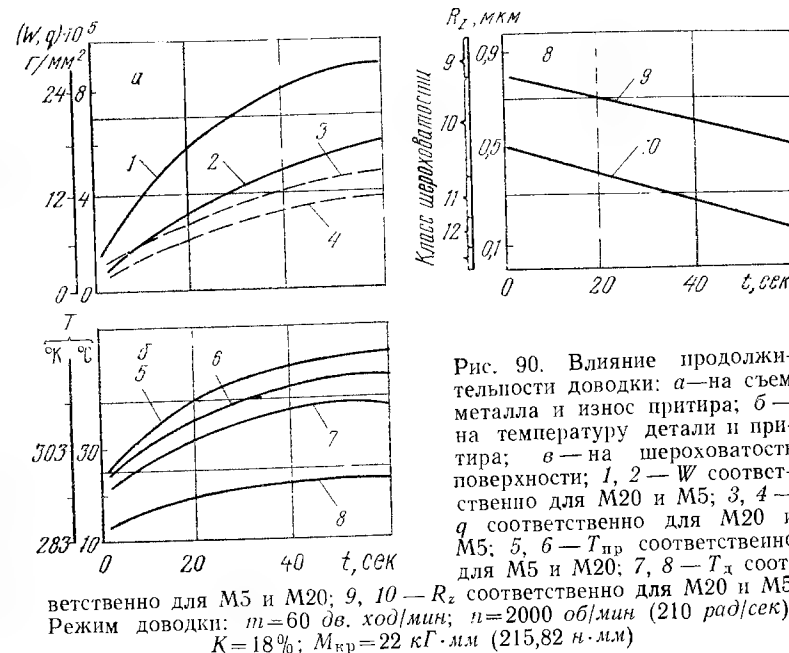


Рис. 90. Влияние продолжительности доводки: а — на съем металла и износ притира; б — на температуру детали и притира; в — на шероховатость поверхности; 1, 2 — W соответственно для М20 и М5; 3, 4 — q соответственно для М20 и М5; 5, 6 — $T_{пр}$ соответственно для М5 и М20; 7, 8 — T_d соответственно для М5 и М20; 9, 10 — R_z соответственно для М20 и М5. Режим доводки: $m=60$ дв. ход/мин; $n=2000$ об/мин (210 рад/сек); $K=18\%$; $M_{кр}=22$ кг·мм (215,82 н·мм)

Износ притира с увеличением длительности доводки также возрастает (рис. 90). Интенсивность износа притира зависит от количества незакрепленных абразивных зерен, находящихся в зазоре между притиром и деталью. В начале процесса доводки, когда происходит закрепление зерен в притире, наблюдается усиленное его изнашивание. Следующее за тем некоторое снижение износа притира указывает на то, что значительная часть свободных зерен в этот момент уже удалена из зоны доводки вследствие разбрызгивания пасты и износ притира происходит в основном за счет перезакрепления оставшихся в зоне доводки зерен, так как новые зерна в эту зону не вводились. Паста наносилась на притир однократно перед вводом его в отверстие.

Достигаемая шероховатость поверхности с увеличением длительности процесса доводки уменьшается (рис. 90). В условиях однократного нанесения пасты на притир это, очевидно, происходит потому, что дробление зерен, сопровождающее процесс доводки, обеспечивает автома-

тический переход на более мелкие абразивные зерна, способные обеспечить высокий класс шероховатости поверхности. Температура в зоне доводки с увеличением длительности процесса в исследованном нами интервале времени также возрастает (рис. 90), сначала резко, а потом стабилизируется.

3. Поиск оптимальных условий доводки

Полученные зависимости (111)—(119) могут быть использованы для предсказания результатов процесса в любой точке исследованной области факторов, а также для уяснения тех направлений изменения переменных факторов, следуя которым можно достичь оптимальных результатов процесса кратчайшим путем.

Известно, что при сравнении эффективности различных вариантов построения технологических процессов в качестве критерия оптимальности процесса можно использовать теоретическую производительность

$$P_t = \frac{1}{t_{p.ц}}, \quad (120)$$

где $t_{p.ц}$ — время рабочего цикла.

Этим же критерием оптимальности можно воспользоваться и при доводке малых отверстий. Величину $t_{p.ц}$ при доводке отверстий можно представить в виде

$$t_{p.ц} = t_{маш} + t_{раб}. \quad (121)$$

Здесь $t_{маш}$ — машинное время операции; $t_{раб}$ — ручное время операции.

Машинное и ручное время доводочной операции можно разделить на две части:

$$t_{маш} = t_{уск} + t_{осн}, \quad (122)$$

$$t_{раб} = t_{н.п} + t_{всп}, \quad (123)$$

где $t_{осн}$ — основное время операции; $t_{уск}$ — время начала операции (время ускоренного разжима притира); $t_{н.п}$ — время нанесения пасты на притир; $t_{всп}$ — прочее вспомогательное время.

Продолжительность части доводочной операции, связанной непосредственно со съемом металла с детали, определим по формуле

$$t_{осн} = \frac{\Delta W}{R_{ср}}. \quad (124)$$

Здесь ΔW — припуск, оставленный под доводку; $R_{ср}$ — средняя интенсивность съема металла в единицу времени.

В условиях однократного нанесения пасты на притир средняя интенсивность съема металла $R_{ср}$ зависит как от того, какой участок по шкале времени ($t_1 - t_0$) принят для ее определения, так и от тех факторов, которые определяют съем металла с детали в единицу времени на данном участке продолжительности процесса.

На основании сказанного $R_{ср}$ можно определить по формуле

$$R_{ср} = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} j dt, \quad (125)$$

где $t_1 - t_0$ — интервал времени, на котором определяется средняя интенсивность съема металла; j — скорость съема металла с детали.

Вполне понятно, что если известна зависимость съема металла от ряда переменных факторов, то величина j равна W/t . Для случая доводки отверстий $\varnothing 6$ мм, длиной 20 мм из стали 18Х2Н4ВА при определении W можно воспользоваться формулами (110) и (115). Тогда при доводке отверстий пастой ЭБМ20

$$j = \frac{t^{0,44} C^*}{t}. \quad (126)$$

Здесь

$$C^* = \frac{n^{0,51} M_{кр}^{0,66}}{2,72^{4,0} K^{0,11} \cdot 10^5}.$$

При доводке отверстий пастой ЭБМ5 имеем

$$j = \frac{t^{0,59} C^{**}}{t}, \quad (127)$$

где

$$C^{**} = \frac{n^{0,366} M_{кр}^{0,76}}{2,72^{4,62} \cdot 10^5}.$$

После подстановки зависимостей (126) и (127) в формулу (125) при условии $t_0 = 0$ получаем

$$R_{ср(ЭБМ20)} = \frac{C^*}{t_1^{0,56} \cdot 0,44}, \quad (128)$$

$$R_{ср(ЭБМ5)} = \frac{C^{**}}{t_1^{0,41} \cdot 0,59}. \quad (129)$$

Из формул (128) и (129) видно, что средняя скорость съема металла при доводке отверстий с $M_{кр} = \text{const}$ уменьшается по мере увеличения продолжительности операции. Время t_1 , в течение которого $R_{ср}$ имеет наибольшее значение, находится в пределах 0—30 сек.

Очевидно, что для получения оптимальных результатов (например, наибольшей производительности P_t) следует проектировать процессы с малой продолжительностью t_1 , когда скорость съема металла с детали наибольшая. Если необходимое для снятия заданного припуска время $t_{осн}$ окажется больше оптимальной продолжительности доводочной операции, то наиболее выгодным направлением в этом случае будет последовательная многократная обработка детали с оптимальной продолжительностью (t_1). Это осуществимо на специальных многошпиндельных

Таблица 58

Сводная карта круглого восхождения при доводке пастой ЭБМ20

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	W	q	W/q
	t	n	$M_{кр}$	m	K	Y_1	Y_2	
Основной уровень	2,05	7,08	2,58	4,44	3,44			
Интервал варьирования								
(J)	2,05	0,52	0,50	0,34	0,50			
$\beta_i(Y_1)$	0,9	0,27	0,33	0,001	0,06			
$\beta_i(Y_2)$	0,56	0,16	0,01	0,09	0,22			
β_j	1,15	0,08	—	0,03	0,11			
Шаг	—	—0,08	—	—0,03	—0,11			
Опыт 1	2,40	7,0	3,09	4,41	3,29			
2	2,40	6,92	3,09	4,38	3,18			
3	2,40	6,84	3,09	4,35	3,07			
4	2,40	6,76	3,09	4,32	2,96	13,0	3,3	4,0
5	2,40	6,68	3,09	4,29	2,85	12,8	3,0	4,3
6	2,40	6,60	3,09	4,26	2,74	12,5	2,5	5,0
7	2,40	6,52	3,09	4,23	2,63	12,5	2,0	6,2
8	2,40	6,44	3,09	4,20	2,52	12,2	1,8	6,8
9	2,40	6,36	3,09	4,17	2,41	11,0	1,8	6,1
10	2,40	6,28	3,09	4,14	2,30	7,5	1,8	4,1
11	2,40	6,22	3,09	4,11	2,19	6,5	1,6	4,0
12	2,40	6,14	3,09	4,08	2,08	6,0	1,6	3,7
13	2,40	6,06	3,09	4,05	1,97	6,0	1,5	4,0
14	2,40	5,98	3,09	4,02	1,86	4,0	1,5	2,6
15	2,40	5,90	3,09	3,99	1,75	3,5	1,5	2,3

станках, где на каждой позиции может быть сохранена одна и та же оптимальная длительность операции t_1 и съем металла с детали осуществляется при последовательном прохождении детали по всем позициям станка. В этом случае значительно сокращается влияние дополнительных элементов времени рабочего цикла $t_{р.ц}$ и обеспечивается высокая производительность доводочной операции.

Как указывалось выше, съем металла с детали W увеличивается с ростом $M_{кр}$ и уменьшается с повышением концентрации абразива в пасте K . В то же время износ притира q снижается с уменьшением n , m , K . Таким образом, для достижения оптимума необходимо увеличивать число оборотов детали n . Однако это вызывает увеличение износа притира. Поэтому критерием оптимальности предварительной доводки логичнее принять не величину теоретической производительности P_t , а относительную производительность процесса W/q . При нахождении оптимального режима предварительной доводки в качестве метода движения к оптимуму может быть использовано кругое восхождение по условному градиенту [150]. Результаты, полученные при осуществлении круглого восхождения при доводке пастой ЭБМ20, приведены в табл. 58. При этом продолжительность процесса оставалась на уровне 30 сек, а крутящий момент — на уровне 22 кг·мм (215,82 н·мм).

Анализ данных, приведенных в табл. 58, показывает, что оптимальными при доводке отверстий пастой ЭБМ20 являются режимы, централь-

ная зона которых — условия опытов 7—9: $t=20-30$ сек; $n=600-700$ об/мин (63—73,5 рад/сек); $M_{кр}=22-25$ кг·мм (215,82—245,25 н·мм); $m=65-70$ дв.ход/мин; $K=11-14\%$. Получающийся при этом съем металла составляет 0,032 мм на диаметр, а износ притира — 0,004 мм на диаметр, стойкость притира в этом случае может быть достаточной для доводки 80—100 деталей. Для получения съема металла с детали в 0,1 мм достаточно использовать трехшпиндельный доводочный станок. При этом основное время процесса доводки останется на уровне $t=30$ сек. Одношпиндельные станки также могут обеспечить съем металла с детали до 0,1 мм. Однако они не являются оптимальными, так как при этом для достижения съема необходимо увеличивать или продолжительность обработки, или скорость доводки, что всегда способствует усиленному износу притира.

Применяющаяся в настоящее время на заводах ручная доводка осуществляется с $n=2000$ об/мин (210 рад/сек), $t=60-90$ сек и поэтому характеризуется очень большим износом притира. Режим ручной доводки не оптимален и по другим переменным факторам. Поэтому низкая производительность процесса сочетается здесь с низким качеством доводки. Использование же только трехшпиндельных станков позволит увеличить производительность доводки в 2 раза. Стойкости трех притиров здесь будет достаточно в среднем для обработки 100 деталей, т. е. расход притиров сокращается примерно в 3 раза по сравнению с ручной доводкой. Использование станков с большим числом рабочих позиций позволит увеличить производительность процесса до 6—8 раз и снизить расход притиров до 8—10 раз.

При определении оптимальных условий процесса окончательной доводки в качестве метода движения к оптимуму было применено симплексное планирование [151]. В качестве критерия оптимальности здесь использованы минимальная шероховатость обработки R_z и минимальный износ притира q . Производились также замеры температуры детали T_d .

Симплексное планирование было выполнено для двух факторов: $M_{кр}$ и m . Остальные переменные были приняты постоянными: $n=700$ об/мин (73,5 рад/сек); $t=30$ сек; $K=18\%$. Результаты экспериментов по методике симплексного планирования представлены на рис. 91 и в табл. 59.

Расположение первоначального симплекса в факторном пространстве взято таким, чтобы оно соответствовало основному уровню переменных факторов при факторном планировании. Для двух переменных факторов правильным симплексом является равносторонний треугольник. Поиск оптимальной зоны осуществлялся путем кантования треугольника (рис. 91) по поверхности отклика. Направление движения к оптимуму устанавливалось после каждого опыта (табл. 59).

В результате экспериментов установлено, что оптимальной зоной при окончательной доводке, как видно из рис. 110 и табл. 65, является зона с $M_{кр}=1-5$ кг·мм (9,81—49,05 н·мм) и $m=90-150$ дв.ход/мин. Шероховатость обработки в этой зоне находится на уровне 12а—12б класса, износ притира составляет 0,0035 мм, что позволяет одним притиром обрабатывать 100—110 деталей; съем металла с детали равен 0,015 мм на диаметр.

В полученных оптимальных областях предварительной и окончательной доводки более подробно изучался процесс и устанавливалась математическая модель его в виде полиномов второй степени. В качестве переменных факторов, влияние которых исследовалось, были приняты окружная скорость вращения детали n , частота возвратно-поступательных перемещений притира t и концентрация абразивных зерен в доводочной пасте K . Крутящий момент и продолжительность доводки были приняты постоянными. При предварительной доводке $M_{кр} = 22 \text{ кг} \cdot \text{мм}$

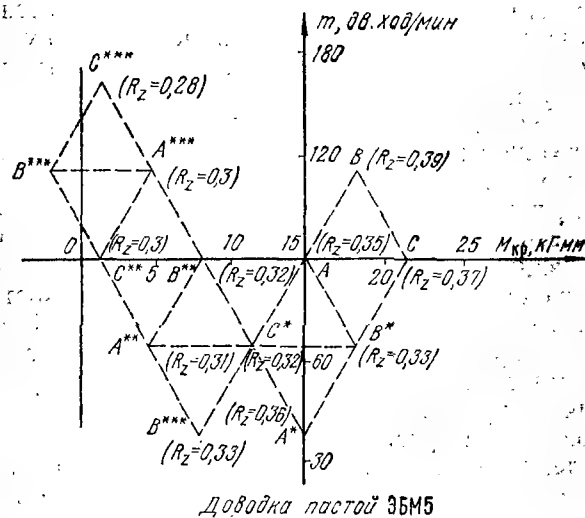


Рис. 91. График движения к оптимуму по методу симплексного планирования

(215,82 н·мм), $t = 30 \text{ сек}$, при окончательной доводке $M_{кр} = 3 \text{ кг} \cdot \text{мм}$ (29,43 н·мм) и $t = 30 \text{ сек}$.

Эксперимент осуществлялся по схеме центрального композиционно-го рототабельного планирования, состоящей из полного факторного эксперимента типа $2^{3/4}$, шести звездных точек и шести центральных. Общее число опытов — 20. Величина плеча звездных точек $2^{3/4} = 1,68$.

В табл. 60 приведены матрица планирования и результаты экспериментов.

Расчет коэффициентов регрессии по формулам работы [151] позволил представить результаты эксперимента полиномами 2-й степени, адекватно описывающими процесс предварительной и окончательной доводки малых отверстий:

а) при доводке пастой ЭБМ20

$$W = 9,8 + 0,25X_1 + 0,11X_2 - 0,88X_3 - 3,75X_1^2 - 5,75X_2^2 - 7,45X_3^2 - 0,025X_1X_3 + 0,2X_2X_3, \quad (130)$$

Результаты движения к оптимуму с применением метода симплекс-планирования экспериментов

Номер опыта	Исходный симплекс	Вершина симплекса, в которой ставится опыт	$M_{кр}$		t		R_2	W	T_d
			код	кг·мм (н·мм)	код	об.ход/мин	мкм	г/мм ² · 10 ⁻²	
1	ABC	A	0	15,0 (147,15)	0	90	0,35	2,8	30(303)
2	ABC	B	0,50	18,5 (181,485)	+0,86	115	0,39	3,0	30(303)
3	ABC	C	1,00	22,0 (215,82)	0	90	0,37	2,8	32(305)
4	ABC	B*	0,50	18,5 (18,145)	-0,86	56	0,33	2,6	30(303)
5	AB*C	C*	-0,50	11,5 (112,815)	-0,86	56	0,31	2,6	25(298)
6	AB*C*	A*	0	15,0 (147,15)	-1,72	38	0,36	2,2	22(295)
7	AB*C*	B**	-1,00	8,00 (78,48)	0	90	0,32	2,8	25(298)
8	AC*B**	A**	-1,50	4,50 (44,145)	-0,86	56	0,31	1,7	22(295)
9	A**C*B**	B***	-1,00	8,00 (78,48)	-1,72	38	0,33	2,2	22(295)
10	A**C*B**	C**	-2,00	1,00 (9,81)	0	90	0,30	0,8	20(293)
11	A**C**B**	A***	-1,50	4,50 (44,145)	+0,86	56	0,30	0,9	20(293)
12	A***C**B**	B****	-2,50	0 (0)	+0,82	56	—	—	—
13	A***C**B****	C***	-2,00	1,00 (9,81)	+1,72	142	0,28	1,0	20(293)

$$\frac{W}{q} = 6,9 + 0,7X_1 + 2,26X_2 - 0,66X_3 - 4,0X_1^2 - 2,5X_2^2 - 4,3X_3^2 - 0,6X_1X_2 + 0,06X_1X_3 - 0,21X_2X_3; \quad (131)$$

б) при доводке пастой ЭБМ5

$$R_2 = 0,237 - 0,035X_1 - 0,025X_2 - 0,02X_3 + 0,021X_1^2 - 0,001X_2^2 + 0,004X_3^2 + 0,015X_1X_2 + 0,015X_1X_3 + 0,0125X_2X_3, \quad (132)$$

$$q = 0,86 + 0,36X_1 + 0,29X_2 + 0,23X_3 + 0,067X_1^2 + 0,032X_2^2 + 0,007X_3^2 + 0,0125X_1X_2 - 0,0125X_1X_3 + 0,0625X_2X_3, \quad (133)$$

$$W = 2,33 + 0,75X_1 + 0,014X_2 + 0,175X_3 + 0,03X_1^2 + 0,05X_2^2 - 0,1X_3^2 + 0,06X_1X_2 - 0,06X_1X_3. \quad (134)$$

Таблица 60

Матрица планирования и результаты экспериментов по схеме центрального композиционного рототабельного планирования

Уровни факторов	Паста ЭБМ5			Паста ЭБМ20			Результаты экспериментов					
	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>m</i>	<i>K</i>	ЭБМ5			ЭБМ20		
							R_z	q	W	q	W	W/q
-1,68	365	70	9	315	20	3	МКМ	$г/мм^2 \cdot 10^{-5}$				
-1,0	500	20	13	450	40	7						
0	700	120	18	650	70	12						
+1,0	900	150	23	850	100	17						
+1,68	1035	170	27	985	120	21						
	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_1	Y_2	Y_3
Опыт 1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,42	0,3	1,5	0,7	3,9	5,60
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,27	0,8	2,9	1,2	9,1	7,70
3	-1	+1	-1	+1	+1	+1	0,25	0,6	1,5	0,5	4,1	8,20
4	+1	+1	-1	+1	+1	+1	0,22	1,4	2,9	1,9	9,2	4,85
5	-1	-1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,5	2,0	1,5	7,7	5,15
6	+1	-1	+1	+1	+1	+1	0,23	1,2	3,0	2,9	12,7	4,40
7	-1	+1	+1	+1	+1	+1	0,24	1,3	1,8	2,1	8,0	3,80
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,20	1,8	3,2	3,5	13,1	3,75
9	-1,68	0	0	2,83	0	0	0,40	0,4	1,0	1,2	7,2	6,00
10	+1,68	0	0	2,83	0	0	0,21	1,8	4,0	3,5	14,5	4,15
11	0	-1,68	0	0	2,83	0	0,30	0,5	2,5	1,0	12,0	12,00
12	0	+1,68	0	0	2,83	0	0,20	1,5	2,6	2,0	12,5	6,25
13	0	0	-1,68	0	0	2,83	0,31	0,5	1,8	0,6	2,5	4,20
14	0	0	+1,68	0	0	2,83	0,22	1,4	2,5	2,8	11,8	4,22
15	0	0	0	0	0	0	0,23	0,8	2,4	1,8	12,2	6,80
16	0	0	0	0	0	0	0,23	0,9	2,6	1,9	12,3	6,50
17	0	0	0	0	0	0	0,24	1,0	2,4	1,7	12,2	7,20
18	0	0	0	0	0	0	0,25	0,8	2,6	1,8	12,2	6,80
19	0	0	0	0	0	0	0,22	0,8	2,4	1,9	12,2	6,40
20	0	0	0	0	0	0	0,25	1,0	2,6	1,7	12,3	7,25

Для определения типа поверхностей, описанных (130)–(134), уравнения были приведены к каноническому виду. Операции приведения осуществлялись ЭВМ «Наири». Алгоритм приведения заключался в последовательном выполнении следующих математических операций:

- 1) представление уравнений (130)–(134) в виде матрицы;
- 2) выделение характеристических уравнений и нахождение их корней;
- 3) нахождение новой ортонормированной базы, определение матрицы перехода;
- 4) отыскивание матрицы, определяющей поворот осей;
- 5) преобразование уравнений (130)–(134) в связи с переносом начала координат в новый центр — точку S .

После преобразования получаем:

$$a) W = -7,48X_1^2 - 3,76X_2^2 - 5,7X_3^2 + 13,0, \quad (135)$$

$$\frac{W}{q} = -4,27X_1^2 - 2,43X_2^2 - 4,09X_3^2 + 9,25; \quad (136)$$

$$b) R_z = 0,0288X_1^2 + 0,009X_2^2 - 0,014X_3^2 + 0,236, \quad (137)$$

$$q = 0,062X_1^2 + 0,057X_2^2 - 0,0147X_3^2 + 0,85, \quad (138)$$

$$W = 0,108X_1^2 + 0,08X_2^2 + 0,007X_3^2 + 40,1. \quad (139)$$

Координаты центральных точек и уравнения для установления зависимости между старыми и новыми координатами приведены в табл. 61.

Так как собственные числа канонических полиномов (135)–(136) имеют одинаковые знаки (—), то описываемая ими поверхность относится к типу «эллипсоид». Центр фигуры является максимумом. Наиболее оптимальны поэтому следующие значения переменных: $X_1 = X_{1s} = -0,1$; $X_2 = X_{2s} = -0,9$; $X_3 = X_{3s} = -0,19$; $n = 630$ об/мин (66,15 рад/сек); $m = 50$ дв.ход/мин; $K = 11\%$. Собственные числа канонических полиномов (137)–(138) имеют разные знаки. Описываемая ими поверхность относится к типу «минимакс», центр фигуры находится вблизи центра эксперимента.

Для отыскания экстремума был использован метод перебора всех комбинаций независимых переменных. По каждой переменной интервал

Таблица 61

Результаты приведения полиномов 2-й степени к каноническому виду

Выходной параметр доводки		Координаты центра фигуры			Зависимости для пересчета
		X_{1s}	X_{2s}	X_{3s}	
ЭБМ20	W	0,04	0,21	0,06	$\bar{X}_1 = 0,98 X_1 + 0,02 X_2 - 0,05 X_3 - 0,04$ $\bar{X}_2 = 0,06 X_1 - 0,5 X_2 + 0,9 X_3 - 0,21$ $\bar{X}_3 = 0,003 X_1 + 0,95 X_2 + 0,5 X_3 - 0,06$
	$\frac{W}{q}$	-0,1	-0,9	-0,19	$\bar{X}_1 = 0,93 X_1 - 0,2 X_2 + 0,29 X_3 + 0,1$ $\bar{X}_2 = 0,19 X_1 - 1,0 X_2 + 0,07 X_3 + 0,9$ $\bar{X}_3 = 0,3 X_1 + 0,01 X_2 + 0,95 X_3 - 0,19$
	R_z	1,62	0,28	0,4	$\bar{X}_1 = 0,77 X_1 + 0,43 X_2 + 0,41 X_3 + 1,62$ $\bar{X}_2 = 0,62 X_1 + 0,5 X_2 + 0,62 X_3 - 0,28$ $\bar{X}_3 = 0,03 X_1 - 0,78 X_2 + 0,6 X_3 - 0,4$
ЭБМ5	q	-6,3	-0,99	2,4	$\bar{X}_1 = 0,98 X_1 + 0,14 X_2 - 0,07 X_3 + 6,3$ $\bar{X}_2 = 0,07 X_1 - 0,75 X_2 + 0,65 X_3 + 3,99$ $\bar{X}_3 = 0,1 X_1 - 0,55 X_2 + 0,85 X_3 - 2,4$
	W	3,4	-5,25	-176	$\bar{X}_1 = 0,27 X_1 - 0,05 X_2 + 1,0 X_3 - 3,4$ $\bar{X}_2 = 0,57 X_1 + 0,8 X_2 - 0,01 X_3 + 5,25$ $\bar{X}_3 = -0,75 X_1 + 0,52 X_2 + 0,21 X_3 + 1,76$

$\pm 1,68$ (величина звездного плеча при планировании) был разбит на 8 частей. После перебора всех $8^3=512$ комбинаций независимых переменных на ЭВМ «Минск-22» были получены следующие экстремальные значения:

а) для q : $X_1=1,68$ ($n=365$ об/мин (38,325 рад/сек)); $X_2=-1,31$ ($m=80$ дв.ход/мин); $X_3=-1,68$ ($K=9\%$);

б) для R_z : $X_1=0,93$; $X_2=0,93$; $X_3=1,68$; $n=900$ об/мин (94,5 рад/сек); $m=150$ дв.ход/мин; $K=27\%$;

в) для W : $X_1=1,68$ ($n=1035$ об/мин (108,675 рад/сек)); $X_2=0$ ($m=120$ дв.ход/мин); $X_3=0$ ($K=18\%$).

В результате анализа полученных экстремальных значений переменных факторов приходим к выводу, что при предварительной доводке оптимальными являются условия, обеспечивающие преобладание закрепленных в притире зерен, а при окончательной, наоборот, свободных абразивных зерен.

Глава VII

ДОВОДКА МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ ПРИТИРАМИ С ПОКРЫТИЯМИ

Проведенные нами исследования показали, что притиры, изготовленные из одного материала и одинаковой твердости, нерационально применять на различных ступенях доводки. В практике производства разжимных притиров на всех ступенях чаще всего используется феррито-перлитный серый чугун твердостью $HV\ 190-217$. Это связано с тем, что такой чугун обладает одновременно хорошей обрабатываемостью резанием и упругостью, позволяющей притиру удерживаться на доводочной оправке. Более мягкие чугуны применяются редко, так как изготовленные из них притиры недостаточно упруги. Использование же более твердых чугунов значительно увеличивает трудоемкость их изготовления.

Для того чтобы использовать положительные свойства чугунных разжимных притиров твердостью $HV\ 190-217$ и одновременно повысить эффективность их применения на различных ступенях доводки, конструкцию разжимного притира следует разделить на два элемента: корпус и рабочий слой (см. рис. 2, с). Корпус притира и рабочий слой могут выполняться из материалов с различными физико-механическими свойствами. В наших экспериментах использовались корпуса притиров, изготовленные из чугуна СЧ 21-40. Для получения на них различных рабочих слоев применяли два метода: первый — наращивание рабочего слоя нанесением на корпус различных гальванических покрытий (медного, никелевого, алмазно-никелевого и др.); второй — изменение физико-механических свойств наружного слоя чугунного притира насыщением его различными легирующими элементами, например кремнием, бором и др.

1. Исследование работоспособности притиров с алмазно-никелевым покрытием

Нанесение алмазно-никелевого покрытия на чугунный корпус разжимного притира заключалось в предварительном гальваническом никелировании поверхности притира, последующем размещении и гальваническом закреплении в никелевой связке слоя равномерно расположенных по цилиндрической поверхности притира алмазных зерен. Толщина одного алмазоносного слоя равна или немного превышает максимальный размер зерен алмазного порошка.

Исследование структуры алмазного слоя толщиной 0,07—0,1 мм (с зерном 40—70 мкм) показало, что на 1 мм² рабочей поверхности притира имеется около 600 алмазных зерен. Вся же поверхность разжимного притира диаметром 6 мм и длиной 18 мм содержит около 200 тыс. закрепленных алмазных зерен (рис. 92).

С нанесением алмазного слоя корпус притира превращается в инструмент с закрепленными алмазными зернами. Дополнительное введение абразивного или алмазного микропорошка в зону контакта с деталью не

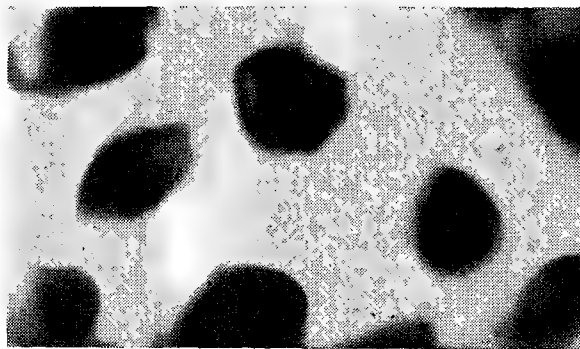


Рис. 92. Участок поверхности алмазоносного слоя (×600)

требуется. Механизм съема стружки при обработке отверстий инструментами с закрепленным абразивом имеет ряд особенностей. При доводке отверстия свободным абразивом зазор между деталью и притиром определяется величиной абразивных зерен. Образующаяся стружка по размерам значительно меньше абразивных зерен, поэтому она может разместиться в зазоре между притиром и деталью. При доводке отверстий притирами с алмазно-никелевым покрытием зазор между деталью и притиром очень мал по сравнению с объемом образующейся стружки.

Эксперименты по доводке отверстий притирами со сплошным алмазно-никелевым покрытием (рис. 93, а) показали, что скопление большого количества стружки в зазоре между притиром и деталью ведет к заклиниванию его в отверстии. Устранить скопление стружки в зоне доводки, а также заклинивание притира в отверстии можно изготовлением в алмазоносном слое продольных канавок (рис. 93, б, в) и введением в зону доводки смазочно-охлаждающей жидкости. Оптимальные размеры канавок в алмазоносном слое притиров, служащих для доводки отверстий Ø 6 мм, должны быть следующими: глубина не более толщины алмазоносного слоя; общая ширина 1/3—1/4 часть от площади цилиндрической поверхности притира; число канавок 3—6. Эксперименты по доводке отверстий притирами с канавками в алмазоносном слое проводились на деталях, изготовленных из стали ХВГ (HRC 60—62). Диаметр обрабатываемого отверстия 6 мм, длина 20 мм. В качестве СОЖ применяли осветительный керосин с добавкой 10% олеиновой кислоты.

Перед доводкой притиры подвергались правке. Правка осуществлялась на доводочной бабке алмазным надфилем. Притиры на доводочную оправку устанавливались с натягом 1—2 мм, затем они окончательно прирабатывались на нескольких деталях с использованием паст из карбида кремния и электрокорунда. Эксперименты по доводке отверстий притирами с алмазно-никелевым покрытием проводились на установке, описанной в гл. III. Пределы изменения переменных факторов были следующими: скорость вращения детали 5—40 м/мин; давление (или крутящий момент) 0—2,2 кГ/см² (0—215,82 кН/м²) или 0—15 кГ/мм (0—147,15 н·мм); скорость осевого перемещения притира 2,5—10 м/мин.

Обработка результатов исследований (установление модели процесса, проверка коэффициентов регрессии и адекватности уравнений) позволила получить следующие математические зависимости [152]:

$$W = \frac{M_{кр}^{0,234} n^{0,39} m^{0,3}}{2,72^{1,57} \cdot 10^5}, \quad (140)$$

$$R_z = \frac{M_{кр}^{0,19} n^{0,07} m^{0,24}}{2,72^{2,02}}. \quad (141)$$

По зависимостям (140) и (141) были построены номограммы, представленные на рис. 94 (ключ к их использованию показан штриховыми линиями). Из полученных формул и номограмм видно, что исследуемые параметры оказывают различное влияние на скорость съема и шероховатость.

В ходе экспериментов установлено, что с увеличением давления в зоне доводки до 1,8 кГ/см² (176,58 кН/м²) или крутящего момента до 12 кГ·мм (117,72 н·мм) съем металла постепенно возрастает. При дальнейшем увеличении давления резко усиливается засаливание инструмента, что ведет к снижению съема и вызывает необходимость частых дополнительных правок притира, значительно повышается шероховатость обработанной поверхности.

С увеличением скорости вращения детали съем металла с нее возрастает. Замечено, что с ростом скорости вращения детали больше 20 м/мин периодичность засаливания инструмента снижается. Это, очевидно, связано с тем, что с увеличением скорости вращения разме-

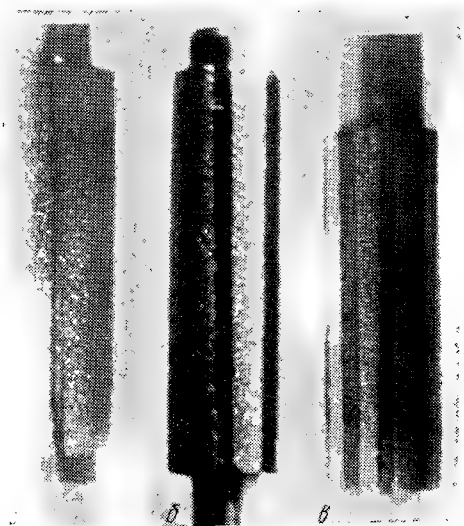


Рис. 93. Притиры с алмазно-никелевым покрытием: а — со сплошным покрытием; б — с четырьмя канавками; в — с шестью канавками

ры срезаемой стружки несколько уменьшаются. С повышением частоты возвратно-поступательных перемещений притира сьем металла возрастает. Однако шероховатость обработанной поверхности при этом также увеличивается.

Притиры с алмазно-никелевым покрытием, содержащим алмазные зерна АСП-4 (величиной 40 мкм) при давлении в зоне доводки 1,8 кГ/см² (176,58 кН/м²), скорости вращения детали 30 м/мин, скорости осевого

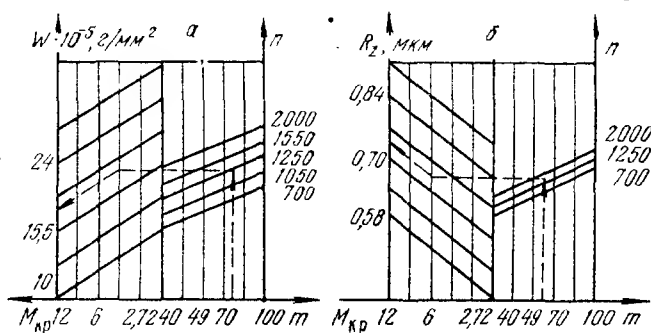


Рис. 94. Номограммы для скорости съема металла с детали (а) и шероховатости поверхности (б)

перемещения притира 3,5 м/мин за 60 сек обработки, обеспечивают сьем металла, равный $25 \cdot 10^{-5} \text{ г/мм}^2$, что соответствует съему припуска 0,035 мм на сторону.

Сравнение работоспособности притиров с алмазно-никелевым покрытием и чугунных без покрытия показало, что притиры с алмазно-никелевым покрытием, содержащим алмазные зерна АСП-4, обеспечивают меньший сьем, чем чугунные, с применением паст ЭБМ40 и почти в 2 раза больший по сравнению с пастой ЭБМ20. При этом шероховатость поверхности достигает 9б—9в класса, в то время как при доводке пастой ЭБМ40 — 8б, а пастой ЭБМ20 — 9а.

Оптимальными в наших экспериментах оказались следующие значения переменных факторов: скорость вращения детали 30—40 м/мин; давление (или крутящий момент) 1,8 кГ/см² (176,58 кН/м² или 12 кГ·мм (117,72 н·мм)); скорость осевого перемещения притира 3,5—7,0 м/мин.

Замеры микротвердости поверхности деталей, обработанных в оптимальных условиях, показали, что при доводке внутренних поверхностей притира с алмазно-никелевым покрытием (АСП-4) степень наклепа и его глубина имеют значения соответственно 2—3% и 0,01—0,015 мм; при доводке же свободным абразивом одинаковой зернистости эти значения выше: 6—8% и 0,02—0,03 мм.

Основное достоинство притиров с алмазоносным слоем — высокая стойкость. Применение их открывает возможность полной автоматизации процесса доводки, значительного повышения культуры доводочных операций.

Высокая жесткость притиров с алмазно-никелевым покрытием позволяет получать высокие результаты по точности обработки, особенно по

исправлению оси и конусообразности. Такие притиры являются представителями новой группы притиров с различными алмазоносными и абразивоносными слоями. Крепление рабочих слоев к корпусу притиров может осуществляться как гальваническим, так и механическим путем. Широкое распространение, например, получил метод крепления с помощью припайки алмазоносных (абразивоносных) пластинок к корпусу притира.

2. Исследование процесса доводки малых отверстий чугунными притирами, рабочая поверхность которых диффузионно насыщена кремнием или бором

В соответствии с результатами, полученными при доводке отверстий обычными чугунными притирами, нами было высказано предположение, что создание в рабочем слое притира губчатой, пористой микроструктуры положительно скажется на результатах доводки.

Как известно, отличительная особенность диффузионного насыщения кремнием железных сплавов (силицирования) — образование значительной пористости в диффузионном слое в процессе силицирования или при последующих нагревах. При определенных условиях силицирования, например в средах, содержащих галогениды, поры представляют собой тончайшие извилистые каналы, пронизывающие весь силицированный слой до границы с основным металлом. Силицирование наружной поверхности разжимных притиров из серого чугуна осуществлялось нами в газовой и твердой средах [86]. Продолжительность силицирования была принята от 2 до 6 час. Исследованы три способа силицирования: газовое, в твердой упаковке и во вращающейся реторте. Микроструктуры силицированного слоя на чугунных притирах, полученные с помощью этих способов, представлены на рис. 95.

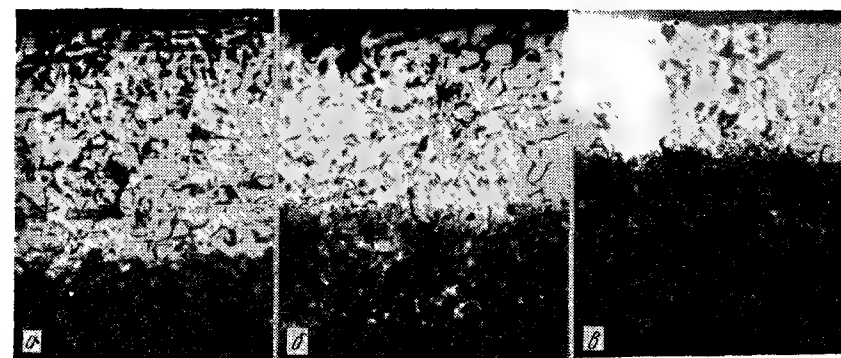


Рис. 95. Микроструктура силицированного слоя чугунных притиров (СЧ 21-40) ($\times 240$): а — силицирование в газовой среде ($\text{H}_2 + \text{SiCl}_4$); б — силицирование в неподвижной реторте в твердой среде ($\text{SiC} + \text{NH}_4\text{Cl}$); в — силицирование в твердой среде ($\text{SiC} + \text{NH}_4\text{Cl}$) во вращающейся реторте

Рентгеноструктурный анализ, выполненный на установке УРС-55, показал, что силицированный слой представляет собой упорядоченный твердый раствор кремния в α -железе (фаза Fe_3Si), содержащий незначительное количество углерода. К этому насыщенному кремнием ферритному слою примыкает перлитная зона сердцевины с повышенным по сравнению с исходным чугуном содержанием углерода. Такое перемещение углерода от периферии к сердцевине объясняется его малой растворимостью в кремнистом феррите. Микротвердость силицированного слоя от периферии к сердцевине почти не снижается и составляет 500—550 кг/мм^2 (49,05—53,955 Мн/мм^2). Для предотвращения отслаивания или растрескивания наружного слоя силицирование следует вести при оптимальной температуре — 960 °С (1233 °К). Кроме того, необходимо стремиться к тому, чтобы коэффициенты объемного расширения сердцевины и слоя были

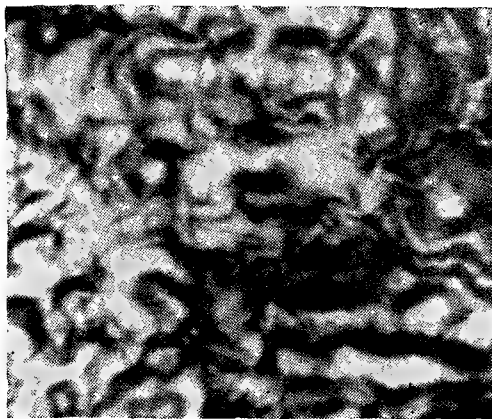


Рис. 96. Микроструктура рабочей поверхности силицированного притира ($\times 775$)

близки. В использованных нами чугунах СЧ 21-40 и СЧ 28-48 этот коэффициент составлял соответственно $4,1 \cdot 10^{-5}$ и $4,3 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$, а у силицированного слоя — $(4,37—4,48) \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.

Исследовались поры силицированного слоя притиров. Металлографический анализ показал, что размеры пор в большинстве случаев не превышают 10—14 мкм . Средняя площадь, занимаемая порами в поверхностных слоях, составляет 25—35%. Регулируя продолжительность процесса силицирования, можно несколько изменять количество и размеры пор. Типичный микрорельеф наружной поверхности силицированного слоя показан на рис. 96 [85].

Исследовано [85] взаимодействие абразивных зерен с поверхностями силицированного притира и детали. Установлена зависимость силы трения в зоне доводки от переменных факторов: удельного давления, зернистости и концентрации абразивного материала. Применялась специальная установка для доводки плоских деталей [87]. Опыты проводились на сталях ШХ15, 18Х2Н4ВА и ХВГ. Были приняты следующие размеры: притира — $20 \times 20 \times 10 \text{ мм}$, детали — $60 \times 10 \times 200 \text{ мм}$. При доводке использовалась паста, содержащая абразивные зерна белого электрокорунда зернистостей М5, М10 и М20. Концентрация абразивного материала изменялась от 20 до 50%. Другие компоненты пасты — олеиновая и стеариновая кислоты и веретенное масло.

Результаты измерения силы трения при доводке стали ШХ15 представлены на рис. 97. Для сталей 18Х2Н4ВА и ХВГ получены

аналогичные зависимости. Из рисунка видно, что в случае применения пасты М20 сила трения в зоне доводки с увеличением удельного давления независимо от концентрации абразивного материала возрастает непрерывно. Для паст М10 и М5 концентраций 20 и 50% повышение силы трения наблюдается только до 2 кг/см^2 (196,2 кн/м^2). Дальнейшее увеличение давления почти не оказывает влияния на силу трения.

Полученные результаты можно объяснить тем, что зерна паст М10 и М5 при давлении больше 2 кг/см^2 (196,2 кн/м^2) «утапливаются» в порах.

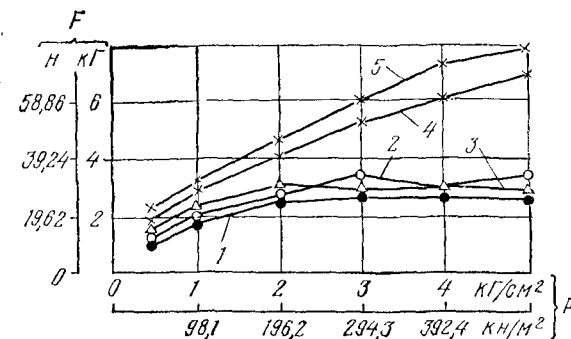


Рис. 97. Влияние удельного давления на силу трения при различных зернистостях и концентрации абразивного материала: 1 — М5 (20%); 2 — М5 (50%); 3 — М10 (20%); 4 — М20 (20%); 5 — М20 (50%)

Контакт притира с деталью осуществляется главным образом через жидкую прослойку маслянистых составляющих пасты, поэтому в диапазоне 2—5 кг/см^2 (196,2—490,5 кн/м^2) сила трения почти не зависит от давления. Для пасты М20 размер абразивных зерен превышает размер пор, «утапливание» зерен в поры затруднено. В связи с этим зависимость силы трения от удельного давления возрастает во всем исследованном диапазоне. Силицированная поверхность плоских притиров исследовалась под микроскопом МИМ-7. Наблюдения показали, что в силицированном слое притиров нет внедренных абразивных зерен. На поверхности плоских притиров в отличие от стальных и чугунных не были обнаружены специфические углубления или следы внедрения зерен, однако в самих порах наблюдалось значительное количество абразивных зерен.

Отсутствие внедренных в силицированную поверхность притира абразивных зерен и факт съема металла с детали свидетельствуют о том, что механизм процесса доводки с применением притиров с пористой силицированной поверхностью отличается от механизма доводки обычными притирами. Отличие состоит в том, что в процессе доводки притирами с пористой поверхностью зерна внедряются не в тело (сплошной металл) притира, а в его поры. Зерна, располагаясь в порах, участвуют в процессе царапания и пластического передоформирования металла, оставляя на обрабатываемой поверхности характерные следы.

Кроме плоских, исследовались также цилиндрические разжимные притиры с силицированной наружной поверхностью сначала в лабора-

терных, а затем в производственных условиях. Опыты проводились на специальной установке с автоматическим разжимом притира, описанной в гл. III. Применялась доводочная паста следующего состава: абразивные зерна ЭБМ5 — 18%; олеиновая кислота — 38,6; стеарин — 31,8; веретенное масло — 11,6%. В деталях из стали 18Х2Н4ВА доводились отверстия диаметром 6 мм и длиной 20 мм. Для определения диаметра, конусности и искривления оси отверстия, а также съема металла с детали применялись пневматические длиномеры завода «Калибр» типа ДП с трубкой 1:1000. Для измерения погрешностей геометрических форм цилиндрических поверхностей в поперечном сечении использовался прибор «Теллеронд-51». Шероховатость поверхности определялась на профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр». Износ притира и съем металла с детали находили методом взвешивания образцов и притиров до и после опыта на аналитических весах АДВ-200. Параллельно проводились линейные измерения. Доводку образцов производили при числе оборотов детали $n=700$ об/мин (73,5 рад/сек), числе двойных возвратно-поступательных ходов притира $m=120$ дв. ход/мин и крутящих моментах $M_{кр}=2$ и 8 кг·мм (19,62 и 78,48 н·мм). Продолжительность каждого опыта 60 сек.

Испытания показали, что с силицированной поверхностью разжимные притиры при $M_{кр}=8$ кг·мм (78,48 н·мм) обеспечивают съем металла в 0,02 мм, а при $M_{кр}=2$ кг·мм (19,62 н·мм) — в 0,008 мм. Износ притира равен соответственно 0,01 и 0,004 мм. Сравнение полученных результатов с данными для стальных и чугунных притиров показывает, что по съему металла и износу притиры с силицированным слоем не уступают обычным притирам. Некруглость отверстия, доведенного таким притиром, колеблется в пределах 0,2—0,4 мкм, его конусообразность и искривление оси — от 0,1 до 0,5 мкм, в то время как обычные притиры обеспечивают некруглость в 0,2—0,8 мкм, а искривление оси и конусообразность — в пределах 0,3—1 мкм.

Измерения шероховатости поверхности отверстий (рис. 98), проведенные при различной продолжительности процесса доводки, показывают, что для силицированных притиров с использованием пасты М20 она выше, чем для чугунных разжимных. Если же размер абразивных зерен меньше размера пор, например при использовании паст М10 и М5, то силицированные притиры дают менее шероховатую поверхность. Доводка силицированными притирами с применением пасты М5 при продолжительности процесса 60 сек обеспечивает шероховатость 13б—13в класса, в то время как обычные притиры при тех же условиях позволяют получить лишь 11в—12а. Получение шероховатости 13-го класса поверхности подтверждает положительную роль микропористости в рабочем слое притиров, а соответственно и силицирования их наружной поверхности. Это объясняется следующими причинами. При разжиме притира поверхностные поры частично или полностью заполняются пастой, которая в процессе доводки по мере его износа освобождается из пор и освежает отработанную пасту. Кроме того, происходит некоторое выравнивание зерен по высоте. Одновременно поры служат оттоком для доводочной стружки. Если размер отдельных частиц стружки или ее скоплений превышает за-

зор между притиром и деталью, они могут оставлять на обрабатываемой поверхности глубокие риски-царапины. При наличии пор или извилистых каналов на поверхности притира образовавшиеся частицы попадают в них, что уменьшает возможность вредного воздействия стружки на обработанную поверхность.

Проведено исследование работоспособности и износостойкости чугунных притиров с пористым рабочим слоем, твердость которого значительно выше твердости силицированного слоя. Для получения такого слоя

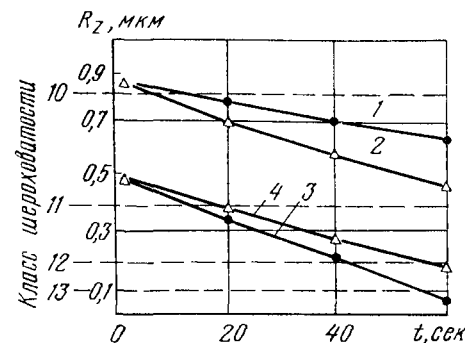


Рис. 98. Шероховатость поверхности в зависимости от продолжительности доводки для чугунных (кривые 2, 4) и силицированных (кривые 1, 3) притиров при обработке 18Х2Н4ВА и различной зернистости пасты: 1, 2 — М20; 3, 4 — М5

применялось диффузионное насыщение наружной поверхности притиров бором (борирование). Нами для борирования чугунных притиров был использован способ электролизного борирования. Притиры из чугуна СЧ 21-40 борировались в расплавленной буре при температуре 900—920°C (1173—1193 °К) и катодной плотности тока 0,2—0,25 а/см² в течение 2 час. Получен боридный слой глубиной 100—120 мкм. Микроструктура слоя изображена на рис. 99. Фазовый состав слоя: бориды железа FeB и Fe₂B и графитовые включения. В борированном слое боридов Fe₂B больше, чем FeB, причем последние расположены ближе к поверхности. Микротвердость боридов для FeB составляет 1900—2100 кг/мм² (18,639—20,601 Гн/м²), для Fe₂B — 1600—1700 кг/см² (15,696—16,677 Гн/м²).

Испытание притиров с борированной наружной поверхностью при режиме предварительной доводки (зернистость пасты ЭБМ40; концентрация 18%; $n=1450$ об/мин (152,25 рад/сек); $M_{кр}=12$ кг·мм (117,72 н·мм); $m=60$ дв. ход/мин) показало, что износ притира, несмотря на высокую твердость его наружной поверхности, больше (0,008 мм на диаметр), чем съем металла с детали (за 60 сек обработки составлял 0,005 мм). За это же время обычный чугунный притир обеспечивал при тех же режимах съем металла, равный 0,04 мм, сам же он изнашивался на 0,004 мм, т. е. в 2 раза меньше, чем борированный притир.

В случае испытания притиров с борированной наружной поверхностью на окончательной доводке (зернистость абразива ЭБМ5; концентрация 18%; продолжительность обработки 60 сек) были приняты два режима:

1) $M_{кр}=8$ кг·мм (78,48 н·мм); $n=700$ об/мин (73,5 рад/сек); $m=120$ дв. ход/мин;

2) $M_{кр} = 1 \text{ кг/мм}$ (9,81 н·мм); $n = 700 \text{ об/мин}$ (73,5 рад/сек); $m = 120 \text{ дв. ход/мин.}$

При доводке с использованием первого режима получены следующие результаты: съем металла с детали 0,003 мм, износ притира 0,005 мм на диаметр; во втором случае износ притира был равен 0,002 мм, а съем металла оставался на том же уровне — 0,002—0,003 мм. Для получения

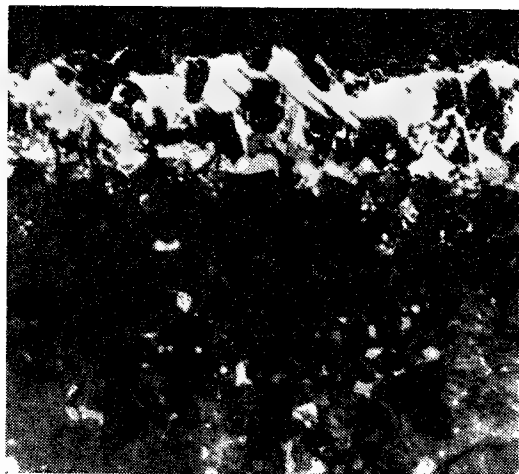


Рис. 99. Микроструктура борированного слоя чугунных притиров

высокого качества обработанной поверхности съема этого припуска недостаточно. Съем припуска можно увеличить, увеличив продолжительность обработки. Увеличение продолжительности доводки до нескольких минут будет рациональным, очевидно, лишь при доводке деталей на многошпиндельных станках.

Результаты, приведенные в данном параграфе, получены в лабораторных условиях, для их внедрения требуется дальнейшее экспериментальное исследование.

3. Работоспособность корпусов притиров с покрытиями

Применение притиров с покрытиями не только расширяет возможность изменения в нужном направлении свойств рабочего слоя притира, но и предопределяет возможность многократного восстановления его. Многократное повторное нанесение на один и тот же корпус притира алмазникелевого покрытия значительно снижает его расход. Однако повсеместное внедрение таких притиров в промышленности затруднено нестабильностью технологии их нанесения и недостаточным качеством обработанной поверхности при применении их на стадии окончательной доводки. На заводе НЗТА (г. Ногинск) для восстановления изношенных

притиров из стали 20 предложен метод протаскивания их через фильеры с последующим гальваническим железнением на толщину изношенного слоя.

В наших исследованиях с целью многократного восстановления рабочего слоя притиров на корпус из чугуна СЧ 21-40 наносились гальванические покрытия методом кислого и цианистого меднения, а также никелирования и др. Такие притиры использовались при предварительной доводке. Установлено, что чугунный корпус притира может оставаться работоспособным при почти двадцатикратной замене на нем рабочего слоя. Ширина продольного паза на притире постепенно увеличивается, а упругость его уменьшается. Чтобы получить предварительные данные, необходимые для обоснования выбора материа-

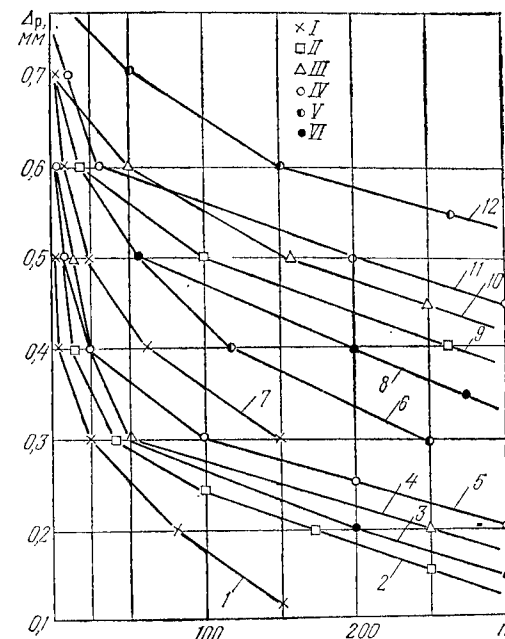


Рис. 100. Влияние величины разжима и числа разжимов на остаточный прирост ширины продольного паза для различных материалов: 1—6— $\Delta_0 = 0,1 \text{ мм}$; 12—0,2; 7—11— $\Delta_0 = 0,3 \text{ мм}$; I—чугун СЧ 21-40; II—силицированные притиры, толщина слоя 0,2 мм (корпус СЧ 21-40); III—борированные притиры, толщина слоя 0,1 мм (корпус СЧ 21-40); IV—чугунные притиры без покрытия, СЧ 28-48; V—сталь 65Г (HRC 35—40); VI—сталь А12

лов на изготовление корпусов притиров, были проведены эксперименты по исследованию способности корпусов разжимных притиров противостоять остаточному увеличению ширины продольного паза. Корпус притира многократно напрессовывали на доводочную оправку с натягом до заданной величины. Средняя толщина стенки притира составляла 1 мм, его длина—18 мм, а конусность внутренней поверхности—1 : 20. Натяг контролировали по ширине продольного разреза. Устанавливалось количество напрессований, необходимое для того, чтобы первоначальная ширина продольного паза увеличилась на заданную величину (на 0,1; 0,2 мм и т. д.). Полученное за счет пластической деформации расширение продольного паза (в зависимости от величины натяга (разжима)) и числа напрессований (числа разжимов) служило критерием оценки пригодности материала для изготовления корпусов притиров.

Результаты экспериментов представлены на рис. 100. Из рисунка следует, что для того чтобы первоначальная ширина продольного паза

корпусе из стали А12 увеличилась на 0,1 мм, необходимо повторное разжимание его 200 раз на ширину 0,2 мм. При разжимании его на 0,4 мм, что приблизительно соответствует величине разжима в процессе доводки деталей, для получения той же остаточной деформации разжимание притира следует повторить 20—25 раз. Этого явно недостаточно, чтобы материал принять для изготовления корпусов под притиры с многократным нанесением покрытия. Для этих целей наиболее перспективными материалами являются сталь 65Г и чугун СЧ 28-48.

Силицирование и борирование наружной поверхности притиров из СЧ 21-40 способствует повышению их упругих свойств. Однако в исследованном нами варианте они немного уступают притирам из СЧ 28-48 (рис. 100). Стойкость корпусов из стали 65Г (*HRC* 35—40) очень высока. Такие притиры допускают, очевидно, более ста замен рабочего слоя (покрытия). В наших экспериментах изменение ширины продольного паза после 50 повторных смен рабочего слоя не было обнаружено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие науки о резании металлов. Пред. редколлегии Н. Н. Зорев. М., «Машиностроение», 1967.
2. П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск, «Наука и техника», 1972.
3. А. А. Гумилевский. Исследование абразивных свойств технического алмаза, рассортированного на группы по цвету флюоресценции в ультрафиолетовом свете. В сб. «Кристаллография». Труды Федоровской научной сессии. М.—Л., Углетехиздат, 1952.
4. И. И. Шафрановский. Алмазы. М.—Л., «Наука», 1964.
5. Г. О. Гомоп. Алмазы. М.—Л., «Машиностроение», 1966.
6. Алмазы Сибири. М., Госгеолтехиздат, 1957.
7. Конструкционные материалы. Энциклопедический справочник, т. 1, 2, 3. М., «Советская энциклопедия», 1963—1965.
8. Н. И. Волский. Обрабатываемость металлов шлифованием. М., Машгиз, 1950.
9. М. В. Классен-Неклюдова, Г. Е. Томиловский. Зависимость прочности кристаллов корунда от кристаллографического направления при испытании их на сжатие и изгиб. В сб.: «Физические свойства синтетического корунда», вып. 8. М., Изд-во АН СССР, 1953.
10. М. И. Гарбер. Декоративное шлифование и полирование. М., «Машиностроение», 1964.
11. Г. Ф. Кудасов. Абразивные материалы и инструменты. Л., «Машиностроение», 1967.
12. В. И. Бакуль и др. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента. Киев, «Техника», 1971.
13. Б. В. Клевин. Абразивные материалы и пасты для декоративного шлифования и полирования. М., ЦНИИТЭИлеггемаш, 1969.
14. Справочная книга по отделочным операциям в машиностроении. Под ред. И. Г. Космачева. Л., Лениздат, 1966.
15. М. И. Гарбер. Комплексная механизация и автоматизация декоративного шлифования и полирования. М., МДНПП, 1958.
16. Минералы и горные породы СССР. Отв. ред. А. И. Гинзбург. М., «Мысль», 1970.
17. С. П. Киселев. Полирование металлов. Л., «Машиностроение», 1967.
18. Б. С. Воронков, Э. М. Тукальская. Диатомит, трепел, опока. М.—Л., Госгеолгиздат, 1947.
19. Г. И. Бушниский, В. А. Франк-Каменецкий. Гидравлическая активность и рентгенометрическая характеристика опалового вещества трепелов и диатомитов. ДАН СССР, 1954, 96, № 4.

20. А. Г. Зайцев. Форма и геометрические размеры зерен алмазного порошка. В сб. «Внедрение алмазов в промышленность». М., НИИМАШ, 1967.
21. А. Г. Зайцев. Исследование линейно-геометрических размеров эльборового шлифзерна. «Изв. вузов», «Машиностроение», 1971, № 8.
22. Г. В. Самсонов. Тугоплавкие соединения. Справочник по свойствам и применению. М., Metallurgizdat, 1963.
23. Синтетические алмазы в обработке металлов и стекла. Под ред. Н. А. Розно. М., «Машиностроение», 1968.
24. Т. Н. Лоладзе, Г. В. Бокучава. Износ алмазов и алмазных кругов. М., «Машиностроение», 1967.
25. H. J. Hamjian, W. G. Lidman. Boron Carbide as a Base Material for a Cermet. Journal of the American Ceramic Society, 1952, 35, № 2.
26. Г. М. Ипполитов. Абразивно-алмазная обработка. М., «Машиностроение», 1969.
27. Карбид кремния. Киев, Гостехиздат УССР, 1963.
28. J. B. Wachtman, Yr. D. G. Lam. Ir. Goung's Modulus of Various Refractory Materials as a Function of Temperature. Journal of the American Ceramic Society, 1959, 42, № 5.
29. G. Wiebke. Die Oxydation von Siliziumkarbid. «Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft», 1960, Bd. 37, № 12, s. 219.
30. Л. Я. Марковский, Д. Л. Оршанский, В. П. Прянишников. Химическая электротермия. Л.—М., Госхимиздат, 1952.
31. Создание и развитие отечественной абразивной промышленности. Труды ВНИИАШ, № 6. Под ред. В. А. Рыбакова. Л., «Машиностроение», 1967.
32. И. В. Гребенщиков и др. Об изготовлении крокуса из болотной руды. Труды Государственного оптического института, т. VIII, вып. 65. Л., ОНТИ ГОИ, 1931.
33. Б. С. Темкин. Производство полированного стекла. М., Государственное изд-во литературы по строительным материалам, 1950.
34. В. В. Масловский. Доводочные и притирочные работы. М., «Высшая школа», 1971.
35. П. Д. Дудко и др. Паста для доводки металлических поверхностей. Авторское свидетельство № 416372. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1974, № 7.
36. А. А. Раков. Новые шлифовально-полировальные пасты. «Машиностроитель», 1967, № 1.
37. В. К. Зарубин, В. А. Парнлов. Шлифовально-полировальная паста. Авторское свидетельство № 168820. Бюллетень «Изобретения и товарные знаки», 1965, № 5.
38. В. А. Парнлов, В. К. Зарубин. Новая паста для полирования цветных металлов. «Станки и инструмент», 1967, № 7.
39. J. Götz, Z. Cozl, J. Kotler. Broušení a leštění skla. Praha, Státní Nakladatelství Technické Literatury, 1963.
40. Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. Основы ферромагнитной обработки металлов. Минск, «Наука и техника», 1974.
41. Г. Б. Лурье, В. В. Масловский. Основы технологии абразивной доводочно-притирочной обработки. М., «Высшая школа», 1973.
42. П. Д. Дудко и др. Обработка деталей абразивными пастами. Ярославль, Верхне-Волжское книжное изд-во, 1970.
43. В. В. Масловский, П. Д. Дудко. Паста для абразивно-доводочной обработки металлических деталей. Авторское свидетельство № 260050. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1970, № 3.
44. В. А. Пастунов, В. Н. Подураев, С. Я. Вейлер. Авторское свидетельство № 186599. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1966, № 19.
45. Р. Ф. Кохан, А. А. Канаев, С. Я. Вейлер. Применение высокоактивных компонентов в абразивных пастах. В сб. «Алмазы», вып. 8. М., НИИМАШ, 1971.
46. В. Н. Бакуль и др. Абразивная паста. Авторское свидетельство № 336340. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1972, № 14.
47. Р. В. Кохан и др. Смачивание алмаза основными компонентами алмазных паст. В сб. «Алмазы», вып. 7. М., НИИМАШ, 1971.
48. Р. Ф. Кохан, А. А. Канаев, С. Я. Вейлер. Метод и прибор для оценки смазочных свойств технологических смазок и абразивных паст. В сб. «Алмазы», вып. 9. М., НИИМАШ, 1971.
49. Я. Я. Ковалинский. Паста для шлифовки, полировки и притирки деталей. Авторское свидетельство № 203119. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1967, № 20.
50. А. Л. Марьясин и др. Шлифовально-полировальная паста. Авторское свидетельство № 269386. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1970, № 15.
51. З. И. Кремень, В. В. Равикович. Изготовление и применение сверхтонких точно классифицированных порошков из монокорунда. ПНТПО № 6-63-89/6. М., ГОСИНТИ, 1963.
52. П. И. Ящерицын, Л. А. Олендер, С. В. Грек. Доводка шариков. Минск, Институт научно-технической информации и пропаганды при Госплане БССР, 1968.
53. А. Г. Зайцев. Влияние размерной однородности алмазного порошка на работу шлифовального круга. В сб. «Производительная обработка материалов», вып. 3. Воронеж, Воронежский политехнический институт, 1972.
54. А. Г. Зайцев. Влияние однородности зернового состава и формы зерна на работу алмазного круга. В сб. «Алмазы», вып. 4. М., НИИМАШ, 1968.
55. Ю. Г. Проскуряков, И. С. Рыжов. Анализ принципиальных схем шаржировальных и притирочных станков и новый станок для шаржирования и притирки плит-притиров. В сб. «Технология чистовой и отделочной обработки поверхностей деталей», № 47. Челябинск, Челябинский политехнический институт, 1969.
56. Е. С. Жданов, И. А. Деминов, С. Р. Белкин. Притирочный станок, например, для правки и шаржирования плит-притиров. Авторское свидетельство, № 105119. Бюллетень «Изобретения и товарные знаки», 1965, № 5.
57. З. И. Кремень, А. И. Павлючук. Абразивная доводка. Под ред. Г. Ф. Курасова. Л., «Машиностроение», 1967.
58. R. J. Swan. Composite Lapping materials and Diamond Compounds. «Ind. Diam. Rev.», 1969, 29, № 349.
59. Л. К. Зотова, В. И. Поляков. Алмазная притирка стальных деталей. «Станки и инструмент», 1966, № 6.
60. Я. А. Бекиров, С. В. Жданов, В. А. Терехов. Притир с разжимной рубашкой для доводки точных отверстий. Авторское свидетельство № 182017. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1966, № 10.
61. А. Н. Акинфиев и др. Притир. Авторское свидетельство 319452. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1971, № 33.
62. В. Н. Морозенко. Доводка глубоких отверстий малых диаметров. «Станки и инструмент», 1963, № 9.

63. M. Tišpovský. Univerzální lapovací trn. «Strojírenská výroba» (ЧССР), 1966, г. 14, čís. 4, s. 296.
64. П. Д. Дудко, И. Ш. Невлюдов, В. С. Ватинов. Абразивная обработка внутренних поверхностей прецизионных деталей. В сб. «Финишная обработка абразивно-алмазными инструментами». Материалы семинара. М., МДНТП, 1973.
65. В. Г. Улегин, А. П. Огородников. Влияние графита и термической обработки на качество шаржированных чугуновых дисков. В сб. «Алмазы», вып. 2. М., НИИМАШ, 1974.
66. Г. И. Панин, Н. А. Фефелов. Механизация и автоматизация процессов обработки прецизионных деталей. Л., «Машиностроение», 1972.
67. Л. Я. Кадигров, В. А. Светличный. Способ притирки внутренних конических поверхностей. Авторское свидетельство № 252110. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1969, № 28.
68. Т. П. Рубцов. Притир. Авторское свидетельство № 173629. Бюллетень «Изобретения и товарные знаки», 1965, № 15.
69. П. Н. Орлов, Т. И. Иногамов, В. А. Наумов. Влияние конструкции инструмента на качество доводки шариков. «Станки и инструмент», 1972, № 3.
70. Т. И. Иногамов. Износ и стойкость притиров при доводке крупных шариков. «Вестник машиностроения», 1974, № 5.
71. С. П. Байков и др. Окончательная безэлеваторная доводка шариков 1 и 0 степеней точности по ГОСТ 3722—60. М., НИИ информации автомобильной промышленности (НИИНАвтопром), 1973.
72. В. Ф. Плоткина. Производство подшипников качения в Японии. М., ОИТЭИ ВНИПП, 1967.
73. F. Fischer. Fräs-oder Schleifmaschine für Kugeln. Patentschrift № 81491, Kl. 67, a. 12.
74. А. Н. Садовников, С. М. Андрион. Способ доводки шариков в кольцевых канавках между двумя вращающимися дисками. Авторское свидетельство № 233476. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1969, № 2.
75. А. М. Гальперин. Чугунные притиры для доводки точных отверстий. «Машиностроитель», 1964, № 3.
76. С. Г. Редько, К. М. Сивяков. Некоторые результаты экспериментального исследования нового способа доводки тел качения шариковых подшипников. Труды Саратовского политехнического института, вып. 51. Саратов, 1972.
77. К. М. Сивяков. Разработка и исследование способа двухдисковой доводки шариков обкаткой в кольцевых канавках с переменными углами контакта. Материалы к 28-й научно-технической конференции Саратовского политехнического института. Саратов, 1970.
78. П. И. Ящерицын, Л. А. Олендер, В. М. Климович. Теоретический анализ кинематики движения шариков в процессе доводки. Весті АН БССР. сер. фіз.-техн. наук, 1973, № 3.
79. Е. Н. Маслов. Теория шлифования металлов. М., «Машиностроение», 1974.
80. И. Я. Глазьев и др. Разжимный притир. Авторское свидетельство № 304120. Бюллетень «Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки», 1971, № 17.
81. А. И. Барботько, Н. И. Белкин. Получение продольного паза в чугунном притире. «Вестник машиностроения», 1971, № 8.
82. С. Д. Пономарев и др. Расчеты на прочность в машиностроении, т. II. М., Машгиз, 1958.
83. И. С. Пеккер, В. В. Павлова. Полирование твердых сплавов. В сб. «Алмазы и сверхтвердые материалы», вып. 4. М., НИИМАШ, 1974.
84. А. Г. Зайцев. Влияние формы алмазного зерна на процесс шлифования сплава ТТ10К8Б. «Вестник машиностроения», 1970, № 9.
85. А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. Доводка прецизионных деталей притирами с силицидным покрытием. «Станки и инструмент», 1975, № 10.
86. В. М. Переверзев, А. И. Барботько. Силицирование серого чугуна. В сб. «Защитные покрытия на металлах», вып. 5. Киев, «Наукова думка», 1971.
87. А. Г. Зайцев, В. М. Переверзев, А. И. Барботько. Новые технологические возможности процесса доводки прецизионных деталей притирами с пористым силицидным покрытием. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции «Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин». М., МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1973.
88. А. Г. Зайцев. Влияние формы алмазного зерна на износостойкость круга при шлифовании новых твердых сплавов. «Вестник машиностроения», 1975, № 2.
89. Э. В. Рыжов и др. Производительность и качество поверхности при алмазном ленточном шлифовании. Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин». М., МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1973.
90. П. И. Ящерицын. Повышение эксплуатационных свойств шлифованных поверхностей. Минск, «Наука и техника», 1966.
91. И. В. Гребенщиков. Роль химии в процессе полировки. «Социалистическая реконструкция и наука», вып. 2. М., ГОНТИ, 1936.
92. А. С. Ахматов. Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиздат, 1963.
93. Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. Трение и смазка твердых тел. М., «Машиностроение», 1968.
94. И. М. Брозголь. Выбор метода окончательной обработки желобов колес. Сборник научно-технической информации, вып. 20. ВНИИПП, 1959.
95. В. А. Кудинов. Температурная задача трения и явления наростообразования при резании и трении. Труды 3-й Всесоюзной конференции по трению и износу, т. II. М., 1960.
96. А. Надан. Пластичность и разрушение твердых тел. М., ИЛ, 1954.
97. Я. С. Уманский. Физическое металловедение. М., Металлургиздат, 1955.
98. П. П. Панасов. Исследование физической сущности процесса плоской притирки при непрерывной подаче абразивной эмульсии. Труды Уральского политехнического института им. С. М. Кирова, вып. 80. Свердловск, Машгиз, 1956.
99. А. И. Барботько, А. Г. Зайцев, С. Д. Кретов. Доводка малых отверстий с регулируемым разжимом притира. В сб. «Финишная обработка абразивно-алмазными инструментами». Материалы семинара. М., МДНТП, 1973.
100. Б. К. Драгунас, Л. П. Кумпикас. Некоторые вопросы притирки плоских поверхностей и методы их решения. Машиностроение. Материалы докладов XVIII научно-технической конференции. Каунас, 1968.
101. Е. Г. Захаров, С. В. Тименский, В. С. Левитин. Исследование влияния легированных добавок на качество чугуновых шарикодоводочных дисков. Труды ВНИИПП, вып. 2 (70). М., Специнформцентр ВНИИПП, 1972.
102. С. М. Кедров. Средства повышения производительности доводки металлов. «Станки и инструмент», 1954, № 6-7.

103. П. И. Ящерицын. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных поверхностей. Минск, «Наука и техника», 1971.
104. И. В. Харченко и др. Методика и установка для определения износостойкости абразивных зерен. В сб. «Абразивы», вып. 4. М., НИИМАШ, 1972.
105. В. А. Хрульков, А. А. Ковалев. Доводка керамических материалов связанным абразивом. В сб. «Алмазная и абразивная обработка». Материалы семинара. М., МДНТП, 1967.
106. А. А. Ковалев. О доводке керамических материалов. В сб. «Внедрение алмазов в промышленность». М., НИИМАШ, 1967.
107. И. В. Крагельский. Трение и износ. М., Машгиз, 1962.
108. Е. Н. Маслов. Основы теории шлифования. М., Машгиз, 1951.
109. З. И. Кремень. Выбор оптимальных условий абразивной доводки металлов. «Вестник машиностроения», 1969, № 5.
110. И. М. Брозголь. Доводка колец из сталей ЭИ347Ш и 9Х18. Труды ВНИИПП, вып. 1 (37). М., ОНТИ, 1964.
111. К. В. Гаришин. Сравнительное исследование инерционной круговой доводки стальных деталей порошками из алмаза синтетического, кубического нитрида бора и электрокорунда белого. В сб. «Алмазно-абразивная обработка», № 79. Пермь, Пермский политехнический ин-т, 1970.
112. П. Н. Орлов. Алмазно-абразивная доводка деталей. М., НИИМАШ, 1972.
113. H. Lichtenberger. Die Spanmengenleistung beim Flachlappen. «Werkstattstechnik und Maschinenbau», 1955, Jg. 45, Heft 4, S. 145—153.
114. Н. Н. Качалов. Технология шлифовки и полировки листового стекла. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1958.
115. А. В. Шубников. Элементарные механические явления при шлифовании и полировании. В сб. «Качество поверхностей деталей машин», вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1957.
116. К. В. Гаришин. Влияние количества абразива и жидкости на результаты процесса притирки плоских поверхностей. В сб. «Повышение прочности и эксплуатационной надежности деталей». Материалы научно-технической конференции. Пермь, Пермский политехнический ин-т, 1968.
117. Н. Н. Курчик и др. Смазочные материалы для обработки металлов резанием. М., «Химия», 1972.
118. G. Pursche. Einflußgrößen des Läppgemisches beim Flachlappen. «Fertigungstechnik und Betrieb», 1965, Bd. 15, № 1, S. 35—38.
119. В. И. Лихтман, Е. Д. Шуккин, П. А. Ребиндер. Физико-химическая механика металлов. М., Изд-во АН СССР, 1962.
120. M. Matsunaga. Fundamental studies of Laping. Report of the Institute of Industrial Science. The University of Tokio, 1966, 16, № 2, S. 105.
121. И. М. Брозголь. Влияние смазочно-охлаждающих жидкостей и поверхностно-активных веществ на производительность операций доводки. Труды ВНИИПП, вып. 4 (56). М., Специнформцентр ВНИИПП, 1968.
122. Б. Трелнел. Хемосорбция. Пер с англ. М., ИЛ, 1958.
123. Е. Р. Брейтуэйт. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. Пер. с англ. М., «Химия», 1967.
124. Ю. Н. Шехтер, С. Э. Крейн. Поверхностно-активные вещества из нефтяного сырья. М., «Химия», 1971.
125. А. В. Черников. Исследование производительности процессов плоской притирки. «Вестник машиностроения», 1965, № 9.
126. П. Д. Дудко. Методика повышения производительности доводки металлов свободным абразивом. «Вестник машиностроения», 1960, № 6.
127. М. С. Наерман, С. А. Попов. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками. М., «Машиностроение», 1971.
128. П. И. Ящерицын. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении. Минск, «Высшая школа», 1974.
129. А. А. Маталин. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства деталей. «Вестник машиностроения», 1968, № 11.
130. Г. К. Маркасян. Технологическая наследственность при образовании поверхности закаленных деталей машин. В сб. «Физика резания металлов», вып. 1. Ереван, 1971.
131. В. Д. Кузнецов. Поверхностная энергия твердых тел. М., ГИТТЛ, 1954.
132. А. Л. Честнов. Вопросы отделочной обработки металлов. М., Изд-во АН СССР, 1961.
133. А. И. Спришевский. Подшипники качения. М., «Машиностроение», 1969.
134. Р. Д. Хотеева. Влияние ультразвуковых вибраций на качество шлифованных поверхностей. «Промышленность Белоруссии», 1967, № 7.
135. С. Д. Медведев. Циклическая прочность металлов. М., Машгиз, 1961.
136. Т. В. Ларин, В. П. Девяткин. О механизме износа железнодорожных колес. В сб. «Трение и износ в машинах», вып. 2. М., Изд-во АН СССР, 1956.
137. Е. И. Зыков и др. Повышение надежности и долговечности роликоподшипников. М., «Машиностроение», 1969.
138. В. С. Рыцова, В. Н. Дмитришин, В. Г. Свиницкая. Повышение износостойкости поверхностей, обработанных доводкой. «Вестник машиностроения», 1973, № 6.
139. А. И. Глазунов, Ю. М. Голышев. Влияние жидкой среды на производительность притирки. «Вестник машиностроения», 1966, № 11.
140. H. Lichtenberger. Das Verschleißverhalten und die Spanmengenleistung genueter Läppschleiben. «Werkstattstechnik und Maschinenbau», 1955, Rd. 45, Heft 6, S. 263—269.
141. H. Grosel. Vorrichtungen ang Zweischeiben lappmaschinen. «Werkstattstechnik und Betrieb», 1954, № 87, Heft 1, S. 163—164.
142. К. Аран. Обработка плоских поверхностей свободным абразивом. «Маснари», 1972, 35, № 517.
143. А. И. Глазунов. Правка притиров для деталей высокой точности. «Производственно-технический бюллетень Московского дома техники», 1960, № 1.
144. В. А. Полухин, П. Н. Орлов. Производительность и качество доводки цилиндрических деталей в условиях серийного производства. В сб. «Финишная обработка абразивно-алмазными инструментами». Материалы семинара. М., МДНТП, 1973.
145. Н. Я. Гольдфарб, М. Л. Локшин. Исследование влияния конструкций плунжеров на искажение их формы в поперечном сечении при плоской доводке. ЦНИТА, вып. 25. Л., ОНТИ, 1965.
146. Б. Н. Кириллин. Влияние кинематики возвратно-поступательного движения при доводке отверстий прецизионных деталей топливной аппаратуры дизелей на точность и производительность обработки. Труды ЦНИТА, вып. 35. Л., ОНТИ, 1967.
147. И. Е. Фрагин, В. Г. Сафронов. Исправление исходной погрешности при доводке свободным абразивом. «Вестник машиностроения», 1963, № 7.
148. А. А. Пайтеев. Автоматизация доводки центрального отверстия в гильзах плунжера. Л., ЛДНТП, 1962.

149. Н. Я. Гольдфарб, М. Л. Локшии. Интенсивность исправления изогнутости оси отверстий в процессе доводки. Труды ЦНИТА, вып. 33. Л., ОНТЭИ, 1967.
150. Ю. П. Адлер и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М., «Наука», 1971.
151. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования эксперимента. М., «Наука», 1966.
152. А. Г. Зайцев и др. Исследование процесса алмазной доводки внутренних поверхностей. В сб. «Производительная обработка материалов», вып. 1. Воронеж, Центрально-Черноземное книжное изд-во, 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I	
Абразивные и технологические материалы, применяемые при тонких процессах абразивной обработки	5
1. Абразивные материалы и их основные свойства	5
2. Доводочные порошки	31
3. Доводочные и полировочные пасты и суспензии	38
4. Приготовление паст и суспензий	62
5. Выбор паст и суспензий	66
Глава II	
Инструменты, применяемые при обработке свободным и полужа- крепленным абразивом	76
1. Притиры, доводочные диски, полировальники, абразив- ные ленты и шкурки	76
2. Прогрессивная технология производства разжимных при- тиров	103
3. Теоретическое и экспериментальное исследование сил и моментов, удерживающих разжимный притир на доводоч- ной оправке	115
Глава III	
Оборудование для абразивной доводки и полирования	131
1. Разновидности доводочных станков и области их приме- нения	131
2. Доводочные станки для обработки плоскостей и наруж- ных цилиндрических поверхностей	133
3. Доводочные станки для обработки отверстий	146
4. Оборудование для доводки шариков	156
5. Полировальные станки	161
Глава IV	
Механизм образования обработанной поверхности и физическая сущность процессов тонкой абразивной обработки	168
1. Физическая сущность процесса полирования и доводки	168
2. Основные технологические факторы, влияющие на эффек- тивность абразивной доводки и полирования	180
Глава V	
Качество поверхности и износостойкость при тонкой финишной об- работке	203
1. Качество и эксплуатационные свойства поверхностного слоя	203

2. Износостойкость, точность и качество поверхности плоских деталей при абразивной доводке	214
3. Правка и шаржирование плоских притиров	223
4. Качество доводки цилиндрических деталей на двухдисковых плоскодоводочных станках	227
5. Качество доводки малых отверстий	232
6. Тонкая алмазная обработка инструментом с ориентированными зёрнами	245
7. Экспериментальное определение оптимальных условий полирования, обеспечивающих наилучшее качество поверхности	251
8. Сравнительные исследования процессов шлифования, полирования и доводки по физико-механическим свойствам обработанных поверхностей и по усталостной прочности	264
Глава VI	
Доводка малых отверстий с регламентированным по величине крутящего момента разжимом притира	280
1. Влияние материала и твердости разжимного притира на его работоспособность	281
2. Многофакторное экспериментальное исследование процесса доводки	284
3. Поиск оптимальных условий доводки	296
Глава VII	
Доводка малых отверстий притирами с покрытиями	305
1. Исследование работоспособности притиров с алмазно-никелевым покрытием	305
2. Исследование процесса доводки малых отверстий чугуниными притирами, рабочая поверхность которых диффузионно насыщена кремнием или бором	309
3. Работоспособность корпусов притиров с покрытиями	314
Литература	317

Ящерицын П. И. и др.

Я97 Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов. Мн., «Наука и техника», 1976.

328 с. с ил.

Перед загл. авт.: П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько.

В книге рассматриваются вопросы совершенствования процессов тонкой абразивной обработки и повышения качества поверхностей и эксплуатационных свойств деталей машин и приборов.— Список лит.: с. 317—324 (152 назв.).

~ Я $\frac{31302-090}{M316-76}$ 128—76

6П5.2

*Петр Иванович Ящерицын
Аркадий Гаврилович Зайцев
Анатолий Иванович Барботько*

**Тонкие доводочные
процессы обработки
деталей машин
и приборов**

Редактор *Н. Т. Ломако*
Обложка *О. А. Бельского*
Художественный редактор *Ю. С. Сергачев*
Технический редактор *Г. И. Якубовская*
Корректор *Н. Г. Баранова*

Печатается по постановлению РИСО АН БССР.
АТ 14090. Сдано в набор 5.V 1976 г. Подписано в печать
26.VIII 1976 г. Бумага тип. № 1. Формат 70×90¹/₁₆. Печ. л.
20,5+I вклейка. Усл. печ. л. 23,98. Уч.-изд. л. 22,6. Изд.
зак. 189. Тип. зак. 579. Тираж 2800 экз. Цена 2 р. 61 к.
Издательство «Наука и техника», Минск, Ленинский про-
спект, 68. Типография им. Франциска (Гесергия) Скорины
издательства «Наука и техника» АН БССР и Госкомитета
СМ БССР по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли. Минск, Ленинский проспект, 68.